

**TITULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
**ESTABILIZACION DE UN SUELO CON CAL Y CENIZA VOLANTE**

**PRESENTADO POR:**  
**NOMBRE** MANUEL GERARDO PARRA GOMEZ **CÓDIGO:** 505587

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**  
**BOGOTA D.C**  
**2018**

**TITULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
**ESTABILIZACION DE UN SUELO CON CAL Y CENIZA VOLANTE**

**PRESENTADO POR**  
**MANUEL GERARDO PARRA GOMEZ    CÓDIGO: 505587**

**ALTERNATIVA**  
**TRABAJO DE INVESTIGACION**

**DOCENTE ASESOR:**  
**ING. JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ PhD**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**  
**BOGOTÁ D.C**

**2018**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>10</b>
<b>1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION .....</b>	<b>13</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	13
1.2 JUSTIFICACION .....	18
1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	19
<b>2. MARCO DE REFERENCIA.....</b>	<b>20</b>
2.1 MARCO TEORICO .....	20
2.1.1 Suelo.....	20
2.1.2 Estabilización de suelos .....	20
2.1.3 Propiedades de los suelos estabilizados .....	21
2.1.4 Caolín .....	23
2.1.5 Cal .....	24
2.1.5.1 Clases de cal.....	24
2.1.5.2 Cal viva .....	25
2.1.5.3 Cal hidratada.....	25
2.1.6 Proceso productivo de la cal .....	27
2.1.7 Estabilización con cal .....	29
2.1.8 Efectos de la cal en la estabilización de suelos .....	31
2.1.9 Ventajas del tratamiento con cal.....	32
2.1.10 Materiales puzolánicos.....	33
2.1.11 Ceniza volante.....	34
2.1.11.1 Caracterización de la ceniza volante .....	35
2.1.11.2 Características físicas .....	36
2.1.11.3 Características químicas .....	37
2.1.12 Mecanismo de reacción .....	38
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	39
2.2.1 Ensayos de laboratorio .....	39

<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>42</b>
3.1	OBJETIVO GENERAL .....	42
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	42
<b>4</b>	<b>ALCANCES Y LIMITACIONES .....</b>	<b>43</b>
4.1	ALCANCE .....	43
4.2	LIMITACIONES .....	43
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>44</b>
5.1	MATERIALES.....	44
5.2	CARACTERIZACIÓN.....	46
5.3	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN .....	51
5.3.1	Ensayo de compresión inconfiada (INV E 152-13), para la combinación caolín-cal y caolín- ceniza.....	53
5.3.2	Ensayo a tracción para la combinación caolín-ceniza y caolín-cal en la maquina MTC de materiales.....	54
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
6.1	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA (INV E-128-13) .....	55
6.2	ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR (INV E 142-13) .....	56
6.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	58
6.3.1	Estabilización de suelo con cal viva .....	58
6.3.2	Estabilización de suelo con ceniza volante .....	60
6.3.3	Comparación de las propiedades del suelo estabilizado con cal y ceniza volante.....	61
6.4	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN .....	65
6.4.1	Estabilización de suelo con cal viva .....	65
6.4.2	Estabilización de suelo con ceniza volante .....	67
6.4.3	Comparación de las propiedades del suelo estabilizado con cal y ceniza volante.....	68
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>77</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de cal según tipo de estabilización.....	30
Tabla 2. Dosificaciones de material estabilizante.....	47
Tabla 3. Masas calculadas a partir de dosificaciones establecidas.....	48
Tabla 4. Masas calculadas a partir de dosificaciones establecidas.....	49
Tabla 5. Resultados, ensayo de gravedad específica.....	55
Tabla 6. Cálculos, ensayo de proctor estándar.....	56
Tabla 7. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con cal.....	62
Tabla 8. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con ceniza.....	62
Tabla 9. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con cal.....	69
Tabla 10. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con ceniza volante.....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso productivo de la cal, desde su extracción hasta el transporte.....	27
Figura. 2. Proceso de activación silico-alcalina, en presencia de aluminosilicatos, formación de material cementante.....	39
Figura 3. Materiales usados para la realización de la investigación, de izquierda a derecha: (a) Caolín, (b) Cal viva y (c) Ceniza volante.....	44
Figura 4. Adición de material estabilizante al suelo de estudio (caolín), de izquierda a derecha (a) cal viva + caolín, (b) Ceniza volante+ caolín.....	49
Figura 5. Caolín + cal viva, homogeneizado manualmente.....	50
Figura 6. Muestra humectada y molde usado para compactacion.....	50
Figura 7. Herramientas para compactación, compactación de material húmedo en molde.....	51
Figura 8. Muestra desmoldada y preparación de cuerpo de prueba para ensayo de compresión y tracción inconfiada.....	52
Figura 9. Ilustración de ruta de falla a compresión en cuerpos de prueba con caolín + cal y caolín + ceniza volante.....	53
Figura 10. Ilustración de falla a la tracción en cuerpos de prueba con caolín + cal y caolín + ceniza volante.....	54
Figura 11. Resultados, ensayo de proctor estándar.....	57

Figura 12. Comparación (muestra control vs dosificaciones de cal) .....	58
Figura 13. Comparación (muestra control vs dosificaciones de ceniza volante)....	60
Figura 14. Esfuerzos máximos vs Porcentajes de cal y ceniza.....	63
Figura 15. Módulo de elasticidad vs Porcentajes de cal y ceniza.....	64
Figura 16. Deformación máxima vs Porcentajes de cal y ceniza.....	65
Figura 17. Comparación (muestra control vs dosificaciones de cal viva).....	66
Figura 18. Comparación (muestra control vs dosificaciones de ceniza volante)...	67
Figura 19. Esfuerzos máximos vs Porcentajes usados.....	70
Figura 20. Deformación máxima vs Porcentajes usados.....	71
Figura 21. Módulo de elasticidad vs Porcentajes usados.....	72



## **RESUMEN**

Este trabajo evaluó en laboratorio, la resistencia mecánica bajo cargas monotónicas a tracción y a compresión de varios cuerpos de prueba de Caolín, mediante adiciones de cal y ceniza volante al 2%, 4%, 6% y 8%, teniendo como base el ensayo de proctor estándar y el suelo de estudio (caolín); previo a esto, se realizó una caracterización de los materiales, y finalmente el objetivo fue determinar el mejoramiento del suelo a través comparaciones, lo cual permitió concluir que la cal otorga una mejor resistencia al caolín en lo referente a esfuerzos y deformaciones máximas , mientras que la ceniza no aportó una significativa mejora al suelo, en términos generales tuvo un mejor comportamiento a tracción sin superar los resultados con cal. En general, si se requiere una estabilización de un suelo de forma rápida, los datos obtenidos perfilan a la cal como una mejor opción de mejora para los suelos.

**PALABRAS CLAVE:** Compresión, Deformación, Esfuerzo, Estabilización, Mejoramiento, Resistencia, Suelo, Tracción.

## INTRODUCCION

Los suelos, en muchas ocasiones no presentan las mejores características para ser usados en los diferentes proyectos de ingeniería, ya que presentan una resistencia deficiente, sufren deformaciones, desgastes y al largo plazo se deterioran de manera negativa a causa de los agentes atmosféricos. De acuerdo a esto, se hace necesario realizar ciertas adecuaciones o procesos que permitan mejorar estas características para volver los suelos aptos para su uso y así, evitar transporte de material adicional que aumenta los costos de las obras y el daño ambiental producto de la explotación de este. Estos procesos constan de cierta manipulación o tratamiento<sup>1</sup> que permiten sacar el máximo provecho de las cualidades del suelo de interés, obteniendo superficies más estables, firmes y capaces de soportar las condiciones más críticas ya sea de tránsito o climáticas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo de investigación está encaminado a mejorar un suelo con alto contenido de arcilla mediante la aplicación del concepto de la Estabilización de suelos, que se define como todo aquel proceso que mejora sustancialmente propiedades tales como estabilidad, durabilidad, resistencia y plasticidad. Cabe resaltar que existen varios tipos de estabilización, como lo son de tipo física donde se mezclan y compactan suelos de granulometría variada para generar cohesión entre

---

<sup>1</sup> Calcinor. [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-de-suelos/>

partículas, y de tipo química, la cual, cambia la estructura interna de los suelos a través de la adición de materiales o sustancias mediante intercambios moleculares generando reacciones químicas; algunos materiales usados para este tipo de estabilización son productos asfálticos, cloruros, polímeros, y para la presente investigación, se utilizara cal viva y cenizas volantes en diferentes dosificaciones para obtener la que mejor características brinde al suelo en estudio (caolín).

Profundizando un poco más en los materiales a utilizar, a lo largo del trabajo se definirán las principales propiedades de estos y algunos antecedentes de uso. Así pues, la cal, históricamente ha sido uno de los materiales más usados en construcciones a través de la historia, pues fue utilizada por los egipcios para la construcción de las pirámides, por la civilización romana para la construcción de vías y en la antigua China para la construcción de la Muralla china. A partir de 1950 que se popularizo el tratamiento de cal en arcillas, lo que dio inicio a la estabilización con cal en carreteras, aeropistas y en general, en vías de gran envergadura<sup>2</sup>. No obstante, a medida que avanzó el tiempo, la cal paso a ser el principal componente para el tratamiento de suelos arcillosos, ya que, como se mencionaba al inicio las propiedades de los suelos no son las más apropiadas y es casi una obligación realizar un tratamiento para iniciar una determinada obra civil.

Teniendo en cuenta esto, la cal se convirtió en una de las mejores opciones

---

<sup>2</sup> Calcinor. [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-de-suelos/>

en cuanto a economía y al ambiente.

La ceniza volante, por otro lado, ha sido un material de gran uso en la ingeniería civil para la fabricación de cemento, conglomeración de capas estructurales en cimentaciones, relleno en autopistas, etc.<sup>3</sup>. Históricamente, sus propiedades se descubrieron paulatinamente a través de investigaciones y su uso ha sido muy variado.

De acuerdo a la descripción de los dos materiales, se pretenderá realizar varios ensayos de laboratorio, entre los que se encuentran Gravedad Específica, Proctor Estándar, y Compresión inconfiada, para así, complementar todo lo concerniente a estabilización de suelos.

Cabe aclarar que este proyecto quiere dar una visión general de cómo se podría estabilizar un suelo mediante toda la investigación teórica que ello implica para finalmente obtener, a través de varios ensayos, con varias muestras, un porcentaje de cal y ceniza que brinde las mejores características mecánicas al suelo en estudio, es decir un porcentaje óptimo de material.

Es importante aclarar que este proyecto se desarrollara de acuerdo a la normatividad vigente (INVIAS 2013), tomando como referencia también, trabajos de grado realizados en años anteriores con similares características teóricas y prácticas.

---

<sup>3</sup> SALAZAR ALEJANDRO. *¿Qué es una puzolana?* [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

## 1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

### 1.1 ANTECEDENTES

El uso de cal a lo largo de la historia ha significado la construcción de muchas obras de ingeniería que perduran hasta la actualidad, y eso da cuenta de las excelentes propiedades que puede brindar este material en cuanto a durabilidad, resistencia y compatibilidad con otros materiales, sin dejar atrás las propiedades adicionales que se generan en conjunto con los suelos, para este caso caolín.

Teniendo en cuenta lo anterior, la cal desde la antigüedad ha sido un material de uso en la construcción de vías. Uno de los precedentes más importantes data del Imperio Romano, en la construcción de la primera vía, denominada La Vía Apia en el año 312 a.c; en este proyecto que pretendía unir varias ciudades de Roma con fines militares y sociales, fue necesario el uso de agregado grueso y cal para lograr una buena superficie de rodadura; se podría decir entonces que esta vía fue el primer precedente de uso de cal en la construcción de vías.

En cuanto a antecedentes de uso de ceniza, se remontan a la edad antigua donde las civilizaciones griega y romana usaron cenizas volcánicas como endurecedor para varias obras portuarias y viales en conjunto con la cal<sup>4</sup>,

---

<sup>4</sup> ULLOA FERNANDEZ, LUIS. Utilización de cenizas volantes en la fabricación de cemento. *Consejo Superior de Investigaciones Científica*. España. Licencia Creative Commons 3.0. Pp. 23.

pues a través de la práctica dedujeron las buenas propiedades de durabilidad y resistencia que ofrecían estos materiales en la construcción.

A medida que avanzó el tiempo, la ceniza se usó con más regularidad, especialmente para mejorar la resistencia del concreto. Este material es producto de la quema del carbón en centrales eléctricas o centrales de fundición.

En Colombia los primeros trabajos en cuanto a cal y ceniza se remontan al siglo pasado, pues hubo un creciente interés en utilizar alternativas para los materiales tradicionales puesto que el país no pasaba por su mejor momento económico, y ciertos residuos industriales empezaron a repercutir en el ambiente de forma crítica<sup>5</sup>. Así que se iniciaron estudios e investigaciones para implementar nuevos materiales que brindaran las mismas o mejores características.

Teniendo en cuenta lo anterior, algunos trabajos de grado especifican ciertos porcentajes de cal, para demostrar la efectividad de esta en las estructuras de pavimento flexible a través de resultados obtenidos con el ensayo de CBR entre los que se encuentran, uno elaborado en la Universidad Tecnológica de Bolívar (Cartagena de Indias) en el año 2006, denominado “Estabilización con cal de suelo de Cartagena para ser utilizado como base”, y tomando como referencia el ya nombrado trabajo, se realizaron ensayos de Humedad natural, Granulometría, Límites de

---

<sup>5</sup> RODRIGUEZ ALEXANDRE; DUCHESNE JOSEE; FOURNIER BENOIT; BISSONNETTE BENOIT. *Costruction materials*. Universidad Laval. Quebec, Canadá. 2018.

Atterberg, Proctor modificado y CBR, por medio de los cuales se llevó a cabo la fase experimental para la obtención de datos primarios donde se tuvo en cuenta los requisitos que exige el INVIAS.<sup>6</sup>

En cuanto a porcentajes de cal utilizados se evidencia que se usaron porcentajes del 2, 3, 5 y 7% que en conjunto con el ensayo de proctor modificado permitieron obtener resultados a los 4, 14 y 28 días.<sup>7</sup>

Es importante resaltar también que se realizaron pruebas mixtas con los diferentes suelos de Cartagena para identificar cuál de ellos brindaba el mejor comportamiento para su aplicación. Finalmente, como conclusión del trabajo citado, los autores pudieron dar cuenta con los diferentes resultados que, en algunas estabilizaciones mixtas, existió un aumento del valor de CBR en el transcurrir del tiempo y además se concluyó que, con un análisis de precios, la estabilización con cal es un método económico para bases granulares.

Otro trabajo realizado con cal se denomina “Normas para la utilización de cal útil en la estabilización de suelos” de la Pontifica Universidad Javeriana del año 1982. En este trabajo, se usaron porcentajes de cal del 0, 2, 4, 8, 10 y 12% que se analizaron con el ensayo de CBR y Límites de Atterberg, lo que dio como resultado un aumento de la resistencia de las muestras analizadas.

---

<sup>6</sup> FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

<sup>7</sup> *Ibíd.*

Debido a que estas muestras, en su mayoría contienen arcilla, la principal característica estudiada fue el índice de plasticidad (plasticidad del suelo), el cual “disminuyo en función del tiempo y fue siempre menor al del suelo no estabilizado, se notaron grandes variaciones desde el 48% hasta el 22% a los 120 días, con una adición del 6% de cal”<sup>8</sup>. Se redujo la expansión notoriamente “aunque al cabo de un periodo se recuperó en un 30%”<sup>9</sup>. En general el trabajo muestra más ventajas que desventajas del uso de cal en la estabilización de suelos.

Cabe resaltar que, porcentajes muy altos de cal (mayores al 14%) generan problemas a las muestras de suelo pues impactan negativamente a la resistencia.

En el trabajo de grado denominado “Estabilización de suelos con cal y cemento” del año 1978, se utilizaron porcentajes de cal de 9, 10, 11, 12, 13 y 14%. Con la aplicación del ensayo de CBR se pudo identificar que el porcentaje óptimo de cal fue del 13% pues brindo la resistencia más alta. En cuanto al porcentaje del 14%, la muestra se analizó de igual forma con ensayo CBR lo que arrojó una disminución crítica de la resistencia de la muestra, que permite deducir, la no utilización de mucho volumen de cal puesto que no es posible obtener resultados satisfactorios en la construcción

---

<sup>8</sup> FRANCO LOPES, LUIS J.; MORALES, JOHNNY. *Normas para la utilización de cal útil en la estabilización de suelos*. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 1982

<sup>9</sup> *Ibíd.*



de estructuras de pavimento<sup>10</sup>.

Así pues, teniendo en cuenta los trabajos realizados con cal en Colombia, se citará a continuación otro trabajo de grado en donde se usó cal y ceniza volante, como valor agregado para optimizar aún más las propiedades del suelo en estudio. Este trabajo denominado “Utilización de mezclas con ceniza y cal en pavimentos flexibles” de la Pontificia Universidad Javeriana, tiene como objetivo reemplazar las capas de agregado normal que se utilizarían por cal de cantera y ceniza de la termoeléctrica Termozipa ubicada en el municipio de Zipaquirá. Básicamente los autores pretenden darles un tratamiento superficial a vías secundarias, especialmente con la novedad del uso de ceniza para “disminuir el desperdicio debido a los altos volúmenes de producción que ocasionan daños ambientales”<sup>11</sup>. De acuerdo con los autores de este trabajo, son múltiples los beneficios que brinda la ceniza puesto que aumenta la resistencia en gran manera.

Aproximadamente para este trabajo se usaron porcentajes de cal y ceniza comprendidos en un rango de 4 a 13% en donde se llegaron a dos conclusiones importantes. En cuanto al uso de cal, los ensayos realizados muestran un aumento en la estabilidad, y los realizados en conjunto con ceniza disminuyen el Índice de Plasticidad, componente importante en suelos con contenido de arcilla.

---

<sup>10</sup> MINOTTA, GUILLERMO. *Estabilización de suelos con cal y cemento*. Trabajo de investigación. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 1962

<sup>11</sup> M. BOTERO, WILLIAM; B. CORDOBA, JORGE. *Utilización de mezclas con ceniza y cal en pavimentos flexibles*. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 1978

Como se observa en las investigaciones citadas, el uso de los dos materiales estabilizantes para el presente trabajo (cal y ceniza volante), se aplicó al mejoramiento de asfaltos y en general a estructuras de pavimento. Teniendo como base los trabajos mencionados, la presente investigación, buscara ahondar aún más en la estabilización de suelos y como estoy repercute en el comportamiento mecánico de estos.

## **1.2 JUSTIFICACION**

La justificación del presente trabajo surge por la necesidad de analizar e identificar materiales que brinden un mejor comportamiento en suelos con alto contenido de arcilla para mejorar sus propiedades geotécnicas.

Lo anterior, se pretende llevar a cabo mediante el estudio del comportamiento mecánico de un suelo, a través de una estabilización química con cal y ceniza volante realizando diversos ensayos de laboratorio basados en la norma INVIAS 2013, que puedan demostrar porcentajes óptimos de estos materiales para disminuir problemas provocados por las arcillas.

El mejoramiento se realizará estableciendo dosificaciones del 2%, 4%, 6% 8% de cal y ceniza para mezclarlos luego con el material en estudio a una humedad establecida por el ensayo de Proctor Estándar, esto teniendo en cuenta los trabajos realizados en las distintas universidades mencionadas.

### 1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA

El mayor problema por tratar durante la construcción, se refiere a la calidad de los suelos *in-situ*, pues se debe garantizar su durabilidad, resistencia, manejabilidad y economía. De acuerdo a esto, en la mayoría de ocasiones los suelos no presentan las mejores características para su uso, por lo que se hace necesario contar con ciertos materiales y procesos que mejoren las características de estos y así obtener parámetros adecuados para ser usados. Por esto, en el presente trabajo se evaluará el uso de cal + caolín y ceniza + caolín para mejorar el comportamiento mecánico del suelo en estudio.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 MARCO TEORICO**

#### **2.1.1 Suelo**

El suelo se define como una mezcla de varios minerales meteorizados y de materia orgánica en descomposición, se encuentra en una capa delgada que cubre la tierra y contiene grandes cantidades de agua y aire que sirven de sustento y soportes a las plantas y demás organismos<sup>12</sup>.

Desde la perspectiva de la ingeniería civil, el suelo se define como un material no consolidado compuesto por partículas líquidas, sólidas y vacíos que ocupan espacio entre ellas.

#### **2.1.2 Estabilización de suelos**

Concepto por el cual se aplican una serie de métodos físicos y químicos para permitir el mejoramiento de una muestra de suelo y así lograr el uso adecuado de este. En el contexto de vías, la estabilización incluye aquellos métodos que permitan mejorar suelos para proporcionar o generar capas que sirvan a una estructura de pavimento, como pueden ser bases, capas de rodadura, sub bases y sub rasantes, llevándolas a condiciones óptimas de humedad y densidad que provean mejores propiedades en cuanto a durabilidad, economía y resistencia.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> DIAZ HECTOR. *Definición de suelo*. [en línea] [fecha de consulta 14 de octubre de 2018). Disponible en: <https://es.slideshare.net/HECTORVICENTEDIAZOSPINA/4-definicion-de-suelo>

<sup>13</sup> *Ibíd.*

Y como se menciona en el artículo “*Soil Stabilization: materials, properties and techniques*”, o “*Estabilización de suelos: materiales, propiedades y técnicas*”, la decisión de estabilizar la mezcla de suelo se debe tomar al tener en cuenta las siguientes ventajas y desventajas:

- Acelerar el proceso de construcción ya que el espesor de pared requerido es generalmente mucho menor y se requiere menos material y mano de obra
- Mejora significativa de la durabilidad y la resistencia, particularmente cuando el suelo disponible localmente es pobre.
- Puede reducir o eliminar la necesidad de costosos tratamientos superficiales o representación.
- Los costos de las materias primas aumentan: el suelo es gratis / de bajo costo y el cemento es relativamente caro
- Los materiales de estabilización necesarios pueden no estar fácilmente disponibles en algunos o puede ser costoso de transportar.<sup>14</sup>

### 2.1.3 Propiedades de los suelos estabilizados

Los suelos que se desean estabilizar deben tener ciertas propiedades físicas previamente establecidas para lograr un buen resultado a la hora de obtener una mejora en sus propiedades, estas son:

- **Resistencia:** Es una propiedad que se hace necesaria aumentar para lograr

---

<sup>14</sup> M. R. HALL, K. B. NAJIM, P. KEIKHAEI DEHDEZI. *Soil Stabilization and earth construction: materials, properties and techniques*. [en línea] [fecha de consulta 18 de marzo de 2018]. University of Nottingham. United Kingdom. 2014

mayor cohesión entre las partículas del suelo, con la adición de cementantes o la compactación de tipo mecánica, vibratoria, por carga o estabilización química (cal), para evitar asentamientos. En el caso de suelos cohesivos (arcillas), se aumenta la resistencia evitando la entrada de humedad en las partículas con la adición de cementantes que, modifiquen la película de agua entre granos o partículas.<sup>15</sup>

- **Compresibilidad:** Se debe tener especial cuidado con esta propiedad pues si no es controlada genera otros daños en el suelo que hacen que no sea apto para el uso; esto quiere decir que las fuerzas entre partículas son débiles lo que provoca desplazamientos o expansiones, esta propiedad se mejora cementando los granos con material rígido para rellenar poros.<sup>16</sup>
- **Permeabilidad:** La permeabilidad se define como la propiedad que tienen los suelos de permitir el paso de un fluido a través de ellos, sin alterar las propiedades existentes. Teniendo en cuenta esto, es importante que el agua circundante tenga un buen medio filtrante para evitar problemas de bombeo y en general dañar el comportamiento del suelo, para esto, se puede adicionar un material impermeable o crear estructuras conglomeradas.<sup>17</sup>
- **Retracción y expansión:** Estas dos propiedades se deben tener en cuenta ya que se producen por los cambios de humedad en el suelo, por lo que es

---

<sup>15</sup> FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

<sup>16</sup> *Ibíd.*

<sup>17</sup> FRANKIE. *Permeabilidad de los suelos: concepto y determinación (in situ y en laboratorio)*. [en línea] [fecha de consulta 18 de marzo de 2018). Disponible en: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>

importante adicionar un mineral arcilloso que pueda mantener la humedad, así como también cementantes que restrinjan la humedad.<sup>18</sup>

- **Durabilidad:** Propiedad de los suelos que se refiere a la resistencia que tenga a procesos de erosión o absorción de cargas por tráfico. En vías, para evitar problemas de durabilidad, se deben construir las diferentes capas con sus respectivos espesores para evitar que se afecten tanto los materiales naturales como los estabilizados.<sup>19</sup>

#### 2.1.4 Caolín

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, originado de la descomposición de rocas feldespáticas, su génesis se da como producto de alteraciones hidrotermales o meteóricas de rocas con contenido de feldespato, también se generan a partir de la erosión de rocas caolinizadas (Uned, 2000)<sup>20</sup>. El termino caolín es referido a arcillas en donde predomina la caolinita como mineral principal; dicho mineral se encuentra en abundancia en la corteza continental y se puede definir como toda roca masiva con porcentajes variables de minerales de arcilla. Su nombre deriva del termino *Ka O Ling*, importante yacimiento chino en la provincia de Kiang Sí.<sup>21</sup>

---

<sup>18</sup> Ibíd.

<sup>19</sup> FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

<sup>20</sup> Crista-mine. *Mineral caolinita*. [en línea]. [Fecha de consulta, 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www2.uned.es/cristamine/inicio.htm>

<sup>21</sup> BARTOLOMÉ J. F. *El caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones*. Instituto de Ciencia de materiales de Madrid. 1997. Recuperado de: <http://boletines.secv.es/upload/111222333.199736007.pdf>

Las principales propiedades físicas de la caolinita son:

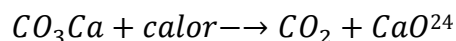
- Color: Blanco, puede presentar tonos azulados o amarillentos.
- Brillo: Mate terreo
- Densidad: 2.6 g/cm<sup>3</sup>

La caolinita a su vez, posee otros silicatos como nacrita y dickita. La nacrita (nácar), y dickita (homenaje al autor francés que describió el caolín gales)<sup>22</sup>

La fórmula estructural de la caolinita es  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  y su composición centesimal corresponde a  $SiO_2=46.53\%$ ,  $Al_2O_3= 39.49\%$  y  $H_2O= 13.98\%$ .<sup>23</sup>

### 2.1.5 Cal

La cal, de diversos usos en construcción y vías, es un producto sólido de color blanco y amorfo, resultado de la descomposición mediante calor (900°C) de roca caliza que se refleja en la siguiente reacción:



En estado natural, se explota el carbonato cálcico ( $CO_3Ca$ ) que se descompone en dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y óxido de calcio ( $CaO$ ) o cal viva para su posterior uso.<sup>25</sup>

#### 2.1.5.1 Clases de cal

Es importante señalar que todas las rocas calizas llevan consigo una cantidad distinta de impurezas que al no eliminarse forman distintos tipos de cal.

---

<sup>22</sup> Ibíd.

<sup>23</sup> Ibíd.

<sup>24</sup> Cienciabit. *Descomposición térmica del carbonato de calcio*. [en línea] [fecha de consulta 22 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://cienciabit.com/wp/?p=620>

<sup>25</sup> Ibíd.



### 2.1.5.2 Cal viva

Tipo de cal obtenido por calcinación que, al desprender dióxido de carbono, se convierte en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), y así, en presencia de agua poder obtener los morteros de cal para realizar tareas de estabilización.<sup>26</sup> Algunas de sus ventajas se traducen en lo económico, pues al existir cantidad de este material se reducen costos por traslado, su almacenamiento se requiere menor volumen disponible, tiene buen comportamiento en temporadas de lluvia ya que disminuye la expansividad de suelos arcillosos. En cuanto a desventajas, la hidratación requiere un cuidado especial y existen problemas de seguridad durante la aplicación.<sup>27</sup>

### 2.1.5.3 Cal hidratada

Tipo de cal con un componente principal de hidróxido de cal proveniente de la reacción del óxido de calcio con el agua.<sup>28</sup> Entre sus ventajas, se encuentra en la facilidad de su aplicación, tiene mayor efectividad en suelos con poca humedad. En cuanto a desventajas, se genera polvo a la hora de la aplicación, mayor costo de traslado debido a su peso volumétrico, la dosificación se pierde en lugares con mucho viento, el proceso de hidratación

---

<sup>26</sup> FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

<sup>27</sup> ANFACAL. *Estabilización de suelos con cal*. [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en: [http://anfocal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Estabilizacion\\_de\\_suelos\\_con\\_cal-REBASA-PresentacionA.pdf](http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estabilizacion_de_suelos_con_cal-REBASA-PresentacionA.pdf)

<sup>28</sup> MURRAY, ANN. *La diferencia entre la cal hidratada y la cal viva*. [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en: [http://www.ehowenespanol.com/diferencia-cal-hidratada-cal-viva-info\\_548324/](http://www.ehowenespanol.com/diferencia-cal-hidratada-cal-viva-info_548324/)

es más caro ya que la mayoría de las veces se realiza en plantas especializadas.<sup>29</sup>

La adición del agua a la cal viva que se puede realizar por medio de tres métodos, que son:

#### **-Aspersión**

Consiste en extender bloques de cal viva en una superficie a las cuales, se les agrega agua entre un 25% y 50% del peso, que luego se cubren con capas de arena para finalmente obtener la cal en polvo.

#### **-Inmersión**

En este caso, los bloques de cal viva se reducen al tamaño de grano de la grava, que luego se colocan en cestos para sumergir en el agua durante 1 minuto. Esto y con la ayuda de corrientes de aire artificial, formar el polvo a medida que se apaga la cal.

#### **-Fusión**

Consiste en introducir bloques de cal en recipientes o depósitos que se llenan de agua para obtener una pasta que es cubierta con una capa de arena para evitar carbonatación.

---

<sup>29</sup> ANFACAL. *Estabilización de suelos con cal*. [Medios audiovisuales]. [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en:  
[http://anfocal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Estabilizacion\\_de\\_suelos\\_con\\_cal-REBASA-PresentacionA.pdf](http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estabilizacion_de_suelos_con_cal-REBASA-PresentacionA.pdf)

### **-Reacción al adicionar agua**

La cal viva reacciona de forma violenta al contacto con el agua, pues es inestable debido a su capacidad de absorción de humedad, generando una reacción exotérmica (expulsión de energía calórica).



### **-Propiedades físicas y químicas:**

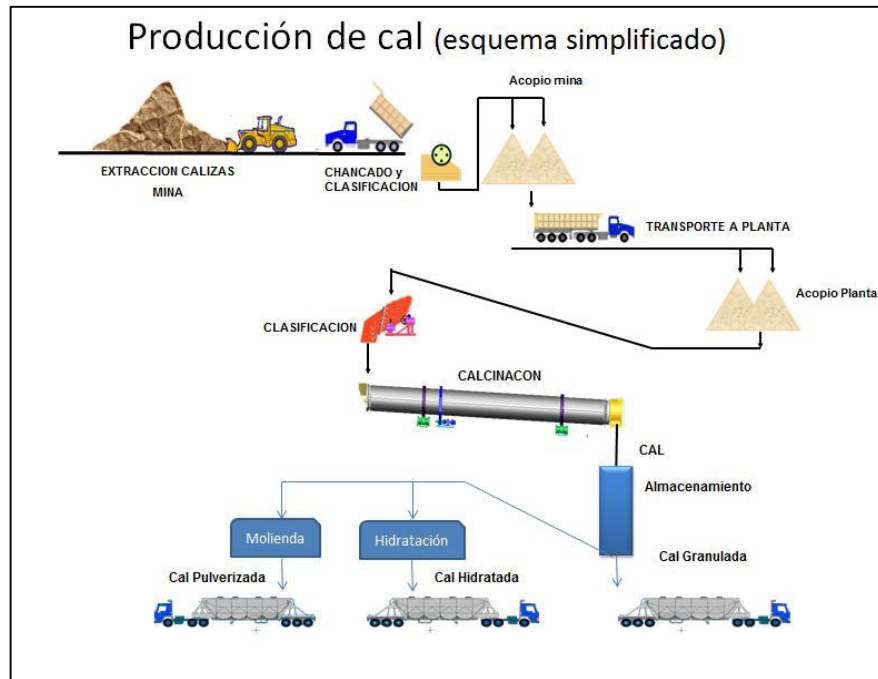
- Olor y apariencia: Sin olor, color blanco o blanco grisáceo, terrones o polvo granular.
- Gravedad específica: 3.37 a 20°C
- Punto de ebullición: 2850°C
- Punto de fusión: 2570°C

PH: 12.5 (Alcalina)

### **2.1.6 Proceso productivo de la cal**

La obtención de cal se puede realizar a través de la calcinación de la piedra caliza para obtener la llamada cal viva, o mediante la extracción y explotación de yacimientos de piedra caliza o naturales (Ver Figura 1).

Figura 1. Proceso productivo de la cal, desde su extracción hasta el transporte.



Fuente. Inacal, Productos y servicios. Cal viva

El proceso de obtención consta de varios pasos, que son:

- **Extracción**

Consiste en realizar un descapote al área de interés, luego se realizan perforaciones para introducir explosivos, se cargan los explosivos y se realiza la correspondiente voladura para llevar a cabo el acarreo del material triturado.

- **Trituración**

Se lleva a cabo la trituración para disminuir el tamaño de los trozos de roca obtenidos en la voladura, los cuales, según la solicitud, se

llevan a una trituración secundaria para obtener trozos de roca de menor tamaño para luego ser llevados a hornos verticales o rotatorios.

- **Calcinación**

Consiste en exponer de manera directa el material al fuego del horno para así, quemar el dióxido de carbono y obtener el óxido de calcio o cal viva.

- **Cribado**

Proceso que se realiza para separar la cal viva de otros granos presentes como guijarros para que pasen a un nuevo proceso de trituración y pulverización.

- **Trituración y pulverización**

Básicamente se realiza para disminuir aún más el tamaño de los granos de cal para su posterior molienda y pulverización.

### **2.1.7 Estabilización con cal**

La estabilización de suelos es un proceso que, en términos generales, busca cambiar las características de estos mejorando la resistencia, estabilidad y durabilidad a largo plazo. Por esto, la cal sola o combinada con otros materiales se usa para tratar una gran variedad de suelos que deben tener ciertas propiedades mineralógicas lo que determina el grado de reactividad con la cal. Teniendo en cuenta lo anterior, según el tipo de grano se puede definir un suelo apto para ser estabilizado, estos son:

- Suelos arcillosos de grano fino (25% mínimo pasa 200) e Índice de

plasticidad mayor a 10, son suelos aptos para estabilización.

- Suelos con alto contenido orgánico y de sulfatos, requieren mayor cantidad de cal acompañados de procedimientos de construcción especiales.<sup>30</sup>

Los porcentajes de cal para agregar están en un rango de entre el 2 y 6% respecto al suelo seco, y según el trabajo de grado de la Universidad tecnológica de Cartagena, no es recomendable agregar más del 6%, pues se aumenta la plasticidad. Los estudios para suelos estabilizados con cal deben ser límites de Atterberg, granulometría y equivalente de arena.<sup>31</sup>

Tabla 1. Porcentajes de cal según tipo de estabilización

Tipo de estabilización	Cantidad de cal ( % en peso de suelo seco)		
	Cal viva	Hidrato de cal	Cal altamente hidratada
Estabilización del suelo: efecto a largo plazo	3 - 6	4 - 8	4- 12
Mejoramiento del suelo: resultados inmediatos	2 - 4	2 -5	4 -8

Fuente. FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

<sup>30</sup> NACIONAL LIME ASSOCIATION. *Manual de estabilización de suelo tratado con Cal: Estabilización y modificación con cal*. [en línea] [fecha de consulta 9 de marzo de 2018]. Disponible en: [https://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf](https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf)

<sup>31</sup> FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

### 2.1.8 Efectos de la cal en la estabilización de suelos

La química de la cal en la estabilización de suelos arcillosos consiste en la reacción existente entre la cal y agua, que produce los siguientes efectos:

- **Secado**

Sucede al usar óxido de calcio que en presencia de agua provoca una reacción exotérmica (generación de calor) la cual evapora la humedad generando el secado, que en presencia de arcilla se acelera mejorando la capacidad portante del suelo en tratamiento. Para el caso de cal hidratada o hidróxido de calcio, el secado solo ocurre por cambios químicos del suelo que reducen la capacidad de este para retener agua, aumentando la estabilidad<sup>32</sup>

- **Modificación**

Luego de la mezcla inicial, los iones de hidróxido de calcio migran hacia las partículas arcillosas para desplazar el agua, convirtiendo al suelo en una masa más fácil de compactar y trabajar, ya que el índice de plasticidad disminuye drásticamente reduciendo fenómenos de hinchamiento y contracción.<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> Calcinor. [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-de-suelos/>

<sup>33</sup> Ibíd.

- **Estabilización**

Consiste en añadir la cantidad adecuada de cal y agua para aumentar el pH del suelo y hacerlo alcalino con el fin de romper las partículas de arcilla. Estimar la cantidad adecuada de cal y agua se realiza a partir de ensayos de laboratorio que buscan, a través de un porcentaje óptimo de cal generar hidratos de calcio y aluminio para producir material cementante. Al producirse la reacción de cal y agua el suelo disminuye su permeabilidad y aumenta la capacidad de carga en pocas horas formando finalmente una capa estructural fuerte y flexible.<sup>34</sup>

#### **2.1.9 Ventajas del tratamiento con cal**

- **Valores de Limite Liquido, Plástico e Índice de Plasticidad**

Como bien se ha nombrado, la cal modifica la plasticidad de los suelos, por lo que para suelos con índices de plasticidad menores a 15, el limite liquido sufre un incremento no tan significativo por la cal. Para suelos con Índice de plasticidad mayor a 15, la cal disminuye el limite líquido y aumenta el LP, por consiguiente, disminuyendo el IP.

- Ganancia progresiva de resistencia a la compresión
- Barrera resistente al agua
- Reducción de agrietamientos debido a la expansión.
- Con las cantidades adecuadas de cal y agua, el pH del suelo aumenta,

---

<sup>34</sup> Ibíd.



favoreciendo la formación de aluminatos de calcio y silicatos (responsables de la resistencia y unión de partículas).<sup>35</sup>

- **Densidad seca**

La compactación de suelo con cal disminuye la densidad seca de este en casi un 5%, esto, debido a que se incrementa la resistencia del suelo. Esto quiere decir que, al existir un agente químico en suelo natural, se produce un nuevo material con propiedades físicas y químicas diferentes, lo que conlleva a que la propia densidad máxima alcanzada tenga mayor resistencia que un suelo original ya compactado.<sup>36</sup>

- **Resistencia del suelo**

Con la adición de cal aumenta y esto debido a las películas que rodean a las partículas de arcilla, es decir, se produce un efecto cementante que permite la unión entre granos; cabe aclarar que este efecto no es inmediato, sino que se va dando a medida que avanza el periodo de curado del suelo. Esto se sabe con la aplicación del ensayo de CBR.<sup>37</sup>

#### **2.1.10 Materiales puzolánicos**

Pueden ser de origen natural o artificial con materiales principalmente silíceos o aluminosos, que contienen bajo contenido de cal. Estos materiales no poseen propiedades ligantes, pero en presencia de hidróxido

---

<sup>35</sup> ANFACAL. *Estabilización de suelos con cal*. [Medios audiovisuales]. [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en: [http://anfocal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Estabilizacion\\_de\\_suelos\\_con\\_cal-REBASA-PresentacionA.pdf](http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estabilizacion_de_suelos_con_cal-REBASA-PresentacionA.pdf)

<sup>36</sup> *Ibíd.*

<sup>37</sup> *Ibíd.*

cálcico se generan reacciones de hidratación las cuales producen una pasta cementante. Es importante aclarar que los principales estudios sobre estos materiales se han realizado en concretos para disminuir el uso de cemento hidráulico convencional.

### **2.1.11 Ceniza volante**

Son residuos producto de la combustión del carbón bituminoso que, al ser tan finos, son lo suficientemente livianos para ser transportados por el gas saliente de un horno. “Durante los últimos 60 años se ha visto incrementado el uso de ceniza volante en aplicaciones de ingeniería en todo el mundo”<sup>38</sup>, y ha sido un material eficaz para la estabilización de suelos.

Son conocidas por ser una puzolana artificial, es decir un material silíceo o silico-aluminoso que puede ser cementante, contiene partículas finas y con la aplicación de humedad reaccionan con hidróxido de calcio presente para formar propiedades cementantes.<sup>39</sup>

Su uso se ha incrementado como apoyo a la disminución de contaminación por material particulado y por traer beneficios en las construcciones en cuanto a reducción de costos en insumos.<sup>40</sup> Y como se menciona en “*Headwaters, construction materials*”, aparte de ser un material de menor costo, reduce el consumo de energía y agua en cuanto a maquinaria y

---

<sup>38</sup> Capítulo 2. *Ceniza volante*. [Medios audiovisuales]. [en línea] [fecha de consulta 22 de abril de 2018]. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/capitulo2.pdf>

<sup>39</sup> THOMAS MICHAEL. Portland Cement Association “*Optimizing the use of fly ash in concrete*”. University of New Brunswick. Pp 2-23. IS548

<sup>40</sup> AGUDELO ANGIE; ESPINOSA BRYAN. *Análisis de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con adición de ceniza volante de Termo Paipa*. Trabajo de investigación en campo. Universidad Católica de Colombia. 2017.

procesos de adecuación se refiere(imprimación).<sup>41</sup>

#### **2.1.11.1 Caracterización de la ceniza volante**

Su primera aplicación a gran escala fue en 1948 en la construcción de la presa Hungry Horse, y a partir de ese año se incrementó el uso en la construcción.

Se pueden clasificar según la norma ASTM C618 como:

- **Clase N**

Puzolanas naturales compuestas de diatomeas, tobas y cenizas volcánicas que requieren calcinación para activar sus propiedades como arcillas y lutitas.

- **Clase F**

Producto de la combustión de antracitas y carbón bituminoso, el cual contiene óxidos ácidos mayores al 70%. Tienen bajo contenido de cal.

- **Clase C**

Producidas por la combustión de lignitos y carbones sub bituminosos con un contenido de óxidos ácidos del 50%. Se caracterizan por tener óxido de cal (CaO) mayor al 10% que le proporciona sus características puzolánicas e hidráulicas.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> HEADWATERS, CONSTRUCTION MATERIALS. [en línea] [fecha de consulta 22 de abril de 2018]. Disponible en: <http://flyash.com/about-fly-ash/>

<sup>42</sup> ARANDA, Pablo. *Efecto de la adición de hidróxido de calcio sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. 2014.

#### 2.1.11.2 Características físicas

Las características físicas de la ceniza volante están dadas en función del proceso o eficiencia de las termoeléctricas, lo que genera gran variedad de propiedades físicas referentes a:

- **Granulometría y aspecto**

Este tipo de ceniza se presenta en forma de polvo muy fino y suave que varía su color dependiendo del contenido de óxido de hierro y el tipo de carbón (gris claro u oscuro). La granulometría de las partículas es inferior a 250 micrómetros, algunas pueden alcanzar tamaños de 1 micrómetro, y en general mientras más fina sea la partícula, menor contenido de carbón y mayor capacidad de reacción puzolánica lo que provee mayor resistencia al suelo en tratamiento.

- **Superficie específica**

Se refiere al número de unidades de área superficial contenidas en una unidad de masa en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , para favorecer la actividad puzolánica, pues entre mayor superficie específica, aumenta la velocidad de reacción debido a la existencia de más puntos de contacto.

- **Densidad**

La densidad de la ceniza volante varía entre 1,88 y 2,84  $\text{g}/\text{cm}^3$ , y tiende a aumentar al ser molida debido a la cantidad de partículas huecas o cenosferas que pueda tener, partículas macizas y contenido de óxido de

hierro.<sup>43</sup>

### **2.1.11.3 Características químicas**

La composición química de las cenizas volantes depende de los componentes del carbón quemado (silicoaluminosas, sulfocalcicas, silicocalcicas). Principalmente las cenizas volantes se componen de material mineral, es decir, partículas vítreas o en fase cristalina producto del brusco enfriamiento después de la elevada temperatura de combustión, que pueden ser sílice, aluminatos de calcio, anhídrita u óxido de calcio libre, encargados de generar la activación química para la producción del material cementante.

#### **- Actividad puzolánica**

Esta propiedad es la más importante en cuanto a estabilización de suelos, pues indica “la rapidez con la que el sílice de la ceniza volante se combina con el hidróxido de calcio (cal hidratada)”<sup>44</sup> para formar un material cementante y aglomerante que aumente la resistencia de los agregados.

#### **- Activadores alcalinos**

Se define como la solución responsable de acelerar la reacción aluminosilicatos para formar hidratos con una estructura compacta, es decir el material cementante.

Los activadores son de tipo alcalino o alcalinotérreos como:

---

<sup>43</sup> ARANDA, PABLO. *Efecto de la adición de hidróxido de calcio sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Valencia. Valencia, España. 2014.

<sup>44</sup> Ibid.

- Hidróxidos: (ROH, R (OH)<sub>2</sub>) R= ion alcalino como Na, K, Li
- Sales acido- débil: (R<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), R<sub>2</sub>S, RF) R= ion alcalino como Na, K, Li
- Sales acido- fuerte: (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O)
- Sales silíceas: (R<sub>2</sub>O (n), SiO<sub>2</sub>)

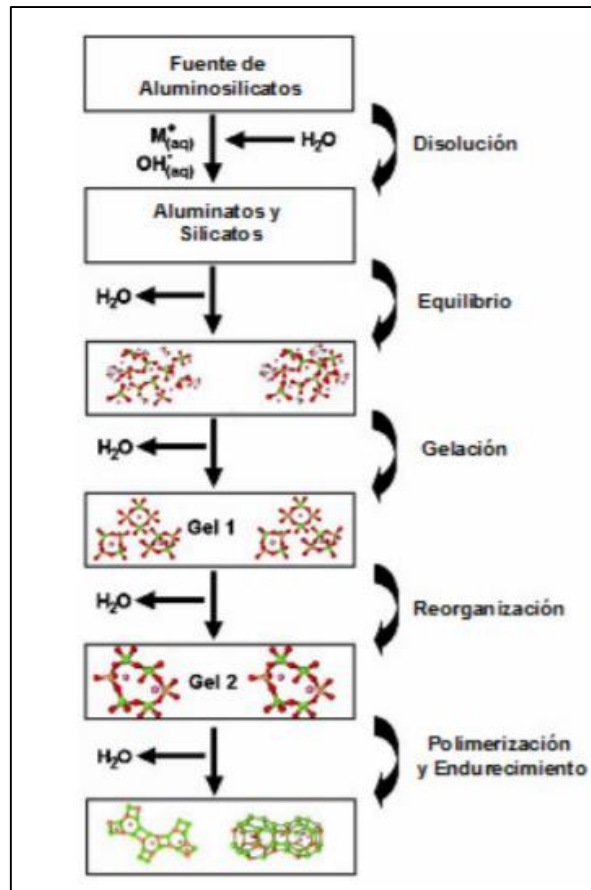
### 2.1.12 Mecanismo de reacción

Los mecanismos de activación se dan principalmente en materiales con alto contenido de calcio, silicio y aluminio denominados escoria de alto horno y materiales con bajo contenido de calcio que forman aluminosilicatos dependiendo de los activadores alcalinos y los componentes del carbón quemado. La *activación alcalina*<sup>45</sup> se produce en cenizas volantes y consta de un proceso químico denominado geopolimerización, que inicia con la disolución de aluminosilicatos en monómeros (unidad básica de polímeros, permite la unión de más moléculas), luego se forman progresivamente dímeros, trímeros, hasta la formación de “gel 1 de aluminosilicatos” con alto contenido de aluminio. Posterior a esto, se forma un “gel 2” donde el Silicio se disuelve para incorporarse al “gel 1”. Por último, el silicio completa su adicción, lo que brinda finalmente las propiedades mecánicas del material (Ver Figura 2)

---

<sup>45</sup> RODRIGUE ALEXANDRE, DUCHESNE JOSEE, FOURNIER BENOIT, BISSONNETTE BENOIT. Construction and building materials. *“Influence of added water and fly ash content the characteristics, properties and early-age cracking sensitivity of alkali-activated slag/fly ash concrete cured at ambient temperature.* 2018. Quebec, Canadá. PP. 930-941

Figura. 2. Proceso de activación silico-alkalina, en presencia de aluminosilicatos.



Fuente: RODRIGUE ALEXANDRE, DUCHESNE JOSEE, FOURNIER BENOIT, BISSONNETTE BENOIT. Construction and building materials. *"Influence of added water and fly ash content the characteristics, properties and early-age cracking sensitivity of alkali-activated slag/fly ash concrete cured at ambient temperature"*. 2018. Quebec, Canadá. PP. 930-941.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1 Ensayos de laboratorio

#### -Proctor estándar

O ensayo de compactación, permite determinar la relación entre la humedad

y la densidad seca de los suelos mediante la compactación con tres diferentes métodos, los cuales se diferencian, por el material que pasa el tamiz N.º. 4, 3/8" y 3/4", los cuales deben tener 5 capas que se deben compactar con 25 golpes (método A), 25 golpes (método B) y 56 golpes (método C). La importancia de este ensayo radica en que se debe lograr el comportamiento óptimo de los materiales, en lo que respecta a resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad.<sup>46</sup>

#### **- Gravedad específica**

O determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua, es un ensayo que permite determinar la relación entre la masa de un volumen de sólidos y una temperatura dada, teniendo como referencia un volumen de agua destilada libre de burbujas a temperatura ambiente. El éxito de este ensayo radica en una buena calibración del picnómetro con agua destilada y eliminando los vacíos que allí se encuentren, para luego repetir el procedimiento con el material de estudio, en este caso caolín, cal y ceniza. Se debe tener especial cuidado al agitar el material, pues es necesario que quede totalmente en suspensión para tomar su peso y llevarlo al horno para obtener el peso seco, que finalmente servirá para obtener el cálculo de la

---

<sup>46</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (INVIAS). *Sección 100. Relaciones humedad-Peso unitario seco, en los suelos (Ensayo estándar de compactación) INV E-141-13*. [en línea] [fecha de consulta 21 de marzo de 2018]. Disponible en: [file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod\\_2013-NOV-15.pdf](file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod_2013-NOV-15.pdf)



gravedad específica.<sup>47</sup>

### **- Compresión inconfiada en muestras de suelos**

Ensayo por medio del cual se puede determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos (alto contenido de arcilla), mediante la aplicación de una carga axial y con el control de la deformación.

El fin de este ensayo es obtener un valor de resistencia a la compresión en suelos con cohesión suficiente para ser ensayos en condición inconfiada.

De acuerdo a esto, la resistencia a la compresión inconfiada, se define como el mínimo esfuerzo compresivo al cual falla una muestra de suelo, se debe tener en cuenta, además, que el valor de resistencia a la compresión será el máximo esfuerzo, o cuando se alcanza el 15% de deformación axial.<sup>48</sup>

---

<sup>47</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (INVIAS). *Sección 100. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua INV E-128-13*. [en línea] [fecha de consulta 21 de marzo de 2018]. Disponible en:

[file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod\\_2013-NOV-15.pdf](file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod_2013-NOV-15.pdf)

<sup>48</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (INVIAS). *Sección 100. Compresión inconfiada en muestras de suelo. INV E-152-13*. [en línea] [fecha de consulta 09 de octubre de 2018]. Disponible en:

[file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod\\_2013-NOV-15.pdf](file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod_2013-NOV-15.pdf)

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar la estabilización química de un suelo (caolín), mediante la adición de cal y ceniza en diferentes porcentajes para determinar la dosificación optima de estabilizante, por medio de la resistencia a la compresión y a la tracción.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterizar física-mecánica de suelo tipo caolín para su utilización en pavimentos.
- Analizar la resistencia a la compresión y tracción del caolín con adición de cal y ceniza volante, para determinar el mejor comportamiento mecánico.
- Comparar el comportamiento mecánico a la compresión y tracción del suelo estabilizado con adición de cal y ceniza volante.

## **4 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **4.1 ALCANCE**

-El proyecto abarcara la estabilización de un suelo arcilloso (caolín) con cal y ceniza para mejorar sus características mecánicas, mediante ensayos de laboratorio dispuestos en la norma INVIAS 2013.

-Realización de 20 ensayos de laboratorio (Compresión inconfiada) para comparar la estabilización de caolín con cal y ceniza volante, y así determinar qué conjunto de materiales brinda mejores características mecánicas.

-El desarrollo del presente trabajo busca demostrar en laboratorio los beneficios de usar un suelo arcilloso con cal y ceniza.

### **4.2 LIMITACIONES**

El presente trabajo está limitado a la estabilización de suelo arcilloso (caolín) mediante la adición de cal y ceniza. Para tal fin, se realizaron únicamente pruebas del laboratorio que evalúan el comportamiento del material ante la aplicación de cargas monotónicas. Sin embargo, es interesante evaluar el comportamiento del material ante la acción de las cargas dinámicas producto del tránsito de vehículos en los pavimentos. En este sentido, como futuras investigaciones se proponen estudiar el módulo resiliente, así como también diferentes tipos de suelos presentados en los grandes proyectos de ingeniería de pavimentos del país y la influencia de diferentes tipos de aditivos estabilizantes.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 MATERIALES

Los materiales utilizados en el presente estudio corresponden a: caolín, cal viva (material convencional) y ceniza volante (material alternativo) (Ver Figura 3).

Figura 3. Materiales usados para la realización de la investigación, de izquierda a derecha: (a) Caolín, (b) Cal viva y (c) Ceniza volante.



Fuente: Google search.

#### - **Caolín**

Caolinita o arcilla blanca, es un silicato de aluminio hidratado (altos porcentajes de silicatos y aluminatos), muy fino, generado naturalmente en zonas hidrotermales o por diversos procesos químicos, de coloración

azulada a amarillenta, con gravedad específica en un rango de 2,4 a 2,6 g/cm<sup>3</sup>, usada en diversas actividades de construcción.<sup>49</sup>

- **Cal viva**

Tipo de cal extraído en cantera y tratado en hornos a altas temperaturas que, al desprender dióxido de carbono, se convierte en óxido de calcio (CaO). Es un material muy usado en lo que refiere a estabilización de suelos y algunas otras actividades constructivas, es económica y de gran versatilidad especialmente para el tratamiento de suelos arcillosos.<sup>50</sup>

- **Ceniza volante**

Material residual y de características puzolánicas (capacidad de la sílice para reaccionar con cal hidratada), producto de la quema del carbón bituminoso en centrales termoeléctricas, es utilizada para mejorar características mecánicas de los concretos y estabilizar suelos. Posee partículas muy finas y se clasifican según su porcentaje de cal, su acción estabilizante mejora considerablemente en conjunto con cal hidratada.<sup>51</sup>

---

<sup>49</sup> BARTOLOMÉ J. F. *El caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones*. Instituto de Ciencia de materiales de Madrid. 1997. Recuperado de: <http://boletines.secv.es/upload/111222333.199736007.pdf>

<sup>50</sup> Calcinor. [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-de-suelos/>

<sup>51</sup> SALAZAR ALEJANDRO. *¿Qué es una puzolana?* [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

## 5.2 CARACTERIZACIÓN

Inicialmente, para la investigación fue necesario consultar algunos conceptos y estado del arte, que permitió tomar como base algunos trabajos de grado (guardando cierta relación con el presente proyecto) realizados en diferentes universidades. Para la caracterización del caolín, se procedió a realizar ensayos de laboratorio consultados en la Norma INVIAS 2013 como Gravedad Específica que consistió en la manipulación de un picnómetro para su correspondiente calibración con agua destilada, y posterior a eso, se adiciono cada uno de los materiales a los cuales, mediante una máquina de succión, se eliminaron los vacíos o burbujas disueltas. Paso siguiente, se llevó al horno la muestra durante 24 horas a 110°C para determinar su peso seco; la ecuación por medio de la cual se determinó la gravedad específica es:

$$G_s = \frac{W_o}{W_o + W_2 - W_1} \quad (1)$$

Donde

$W_o$  = Peso seco

$W_1$  = Picnómetro + material

$W_2$  = Picnómetro + agua

Calculada la gravedad específica de cada material, se realizó el ensayo de Proctor Estándar, por medio del cual fue posible obtener parámetros de densidad máxima y humedad óptima (Ver Grafica 1).

Realizada la caracterización, se establecieron las dosificaciones de cada material para luego agregarlas al suelo a estabilizar (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Dosificaciones de material estabilizante

<b>Muestras</b>	<b>Proporción en porcentaje</b>		
	<b>Caolín</b>	<b>Cal</b>	<b>Ceniza</b>
Control-Caolín	<b>100</b>	0	0
Caolín-Cal	98	<b>2</b>	0
	96	<b>4</b>	0
	94	<b>6</b>	0
	92	<b>8</b>	0
Caolín-Cal	98	0	<b>2</b>
	96	0	<b>4</b>
	94	0	<b>6</b>
	92	0	<b>8</b>

Fuente: El autor.

Establecidas las dosificaciones, se adquirió el material suficiente en depósitos comerciales de materiales para construcción en bultos de 50 kg (caolín o caolinita, cal viva), y ceniza volante (obtenida de Termo Zipaquirá). Adquiridos los materiales y definidas las dosificaciones, se partió de los parámetros de humedad óptima y densidad seca máxima para calcular la masa necesaria según la dosificación requerida (Ver Tabla 3, Tabla 4), con la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2) \quad \Rightarrow \quad m = \rho * V \quad (3)$$

- Donde:

$\rho$ = Densidad seca máxima (g/cm<sup>3</sup>)

$m$ = Masa necesaria (g)

$V$ = Volumen de molde a utilizar (cm<sup>3</sup>) (Ver figura 3)

Tabla 3. Masas calculadas a partir de dosificaciones establecidas

Porcentajes	Material y dosificación (%)		Masa final
	(g)		
100%	Caolín	100%	400
98%	Cal	-2%	392
96%		-4%	384
94%		-6%	376
92%		-8%	368

Fuente: Autor.

*Nota. Se seleccionó una masa de 400g para facilitar los cálculos, y compensar pérdidas de material en el laboratorio.*



Tabla 4. Masas calculadas a partir de dosificaciones establecidas

<b>Porcentajes</b>	<b>Material y dosificación (%)</b>		<b>Masa final (g)</b>
100%	Caolín	100%	400
98%	Ceniza	-2%	392
96%		-4%	384
94%		-6%	376
92%		-8%	368

Fuente: El autor.

Obtenidas las masas para cada porcentaje, se procedió a mezclar en recipientes procurando homogeneizar de la mejor manera para garantizar la distribución de partículas. (Ver figura 4, Figura 5).

Figura 4. Adición de material estabilizante al suelo de estudio (caolín), de izquierda a derecha, (a) cal viva + caolín, (b) Ceniza volante+ caolín.



Fuente. El autor

Figura 5. Caolín + cal viva, homogeneizado manualmente



Fuente: El autor.

Realizado el mezclado en seco, se verifico en la balanza la masa de 400g para luego adicionar un volumen de agua equivalente a 78ml de acuerdo a la humedad optima calculada en el ensayo de proctor estándar, para proceder con la compactación (Ver figura 6).

Figura 6. Muestra humectada y molde usado para compactacion



Fuente: El autor

La compactación se realizó con herramientas dispuestas en el área de laboratorio, adicionando poco a poco la masa calculada en el molde y aplicando una fuerza de compactación suficiente para que la masa de material húmeda quede al ras del borde superior del molde (Ver figura 7).

Figura 7. Herramientas para compactación, compactación de material húmedo en molde.



Fuente. El autor.

### 5.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

Como se mencionó en los objetivos, previamente a la aplicación práctica de la investigación se estableció una cantidad de 18 cuerpos de prueba para ser fallados a compresión y tracción para obtener datos de esfuerzos máximos, deformaciones máximas y módulo de elasticidad. Los 18 cuerpos de prueba se definieron para cada ensayo a realizar, es decir, para la prueba de resistencia a la compresión se estableció la muestra de control (100% caolín) y teniendo en cuenta que la dosificación es igual

para cal viva y ceniza volante (2%, 4%, 6% 8%), los cuerpos de prueba a fallar, fueron respectivamente 4 para cal viva y 4 para ceniza volante, para un total de 8. De igual forma, se realizaron otros 4 cuerpos de prueba para cal viva y 4 de ceniza volante y uno nuevo de control (100% caolín) para resistencia a la tracción. En términos generales se replicó el procedimiento para cada ensayo con el fin de poder realizar comparaciones. Realizada la compactación del material, se desmoldo la muestra con precaución de no dañarla para fallar cada cuerpo de prueba a compresión y tracción. (Ver figura 8).

Figura 8. Muestra desmoldada y preparación de cuerpo de prueba para ensayo de compresión y tracción inconfiada.



Fuente: El autor.

### 5.3.1 Ensayo de compresión inconfiada (INV E 152-13), para la combinación caolín-cal y caolín- ceniza

El ensayo de compresión inconfiada se realizó respectivamente a 9 cuerpos de prueba, descritos en la metodología, con el fin de aplicar cargas monotónicas para inducir los cuerpos de prueba a la falla por compresión y así obtener datos de esfuerzo máximo, deformación máxima y módulo de elasticidad para la cal, caolín y ceniza volante. Algunos ejemplos de falla se muestran en la Figura 9.

Figura 9. Ilustración de ruta de falla a compresión en cuerpos de prueba con caolín + cal y caolín + ceniza volante.



Fuente: El autor



### 5.3.2 Ensayo a tracción para la combinación caolín-ceniza y caolín-cal en la maquina MTC de materiales

El ensayo a tracción se realizó respectivamente a 9 cuerpos de prueba, descritos en la metodología, con el fin de aplicar cargas monotónicas para inducir los cuerpos de prueba a la falla por tracción y así obtener datos de esfuerzo máximo, deformación máxima y módulo de elasticidad (rigidez) para la cal, caolín y ceniza volante. Algunos ejemplos de falla se muestran en la Figura 10.

Figura 10. Ilustración de falla a la tracción en cuerpos de prueba con caolín + cal y caolín + ceniza volante



Fuente. El autor

## 6 ANÁLISIS RESULTADOS

### 6.1 ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA (INV E-128-13)

En la Tabla 5. Se ilustran los resultados del ensayo de gravedad específica para la cal, ceniza volante y caolín.

Tabla 5. Resultados, ensayo de gravedad específica

<b>Gravedad específica</b>			
<b>Datos de Ensayo</b>	<b>Ceniza</b>	<b>Cal</b>	<b>Caolín</b>
Wo (g)	49,3	61,54	48,38
W1(g)	677,44	681,5	681,52
W2 (g)	650,94	650,84	650,78
<b>Gs</b>	<b>2,16</b>	<b>1,99</b>	<b>2,74</b>

Fuente. El autor

- De acuerdo al cálculo realizado y teniendo en cuenta la ecuación (1) y (2) se obtuvo la gravedad específica de cada material a utilizar, evidenciándose que los valores no tienen una variación significativa entre sí, los diseños de la mezcla de acuerdo a las proporciones descritas en la metodología se determinaron en peso y no por volumen.
- Si por el contrario se hubieran obtenido resultados con variaciones significativas, el diseño de mezcla se realizaría por volumen.

## 6.2 ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR (INV E 142-13)

- Los datos calculados para el presente ensayo fueron obtenidos a partir de la compactación del suelo de interés (caolín) en un cilindro de 101,6mm, con 25 golpes en tres capas (según lo dispuesto en la norma INV E 142-13). Los datos se presentan en la Tabla 6., donde los más relevantes se encuentran subrayados, ya que para obtener los parámetros de humedad optima y densidad seca máxima, se hace necesario realizar una gráfica de Densidad seca vs Contenido de humedad (Ver Figura 11).

Tabla 6. Cálculos, ensayo de proctor estándar

ENSAYO	1	2	3	4
<b>Humedad requerida (%)</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>
<b>Volumen molde (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>950,34</b>			
<b>Material +molde (g)</b>	1611,00	1912,00	1795,00	1746,00
<b>Masa molde (g)</b>	4609,00	4609,00	4609,00	4609,00
<b>Molde +material comp. (g)</b>	6220,00	6521,00	6404,00	6355,00
<b>Tara + material húmedo (g)</b>	168,10	169,60	179,80	174,00
<b>Tara + material seco (g)</b>	158,00	155,80	163,00	143,90
<b>Tara (g)</b>	42,10	38,80	44,50	37,00
<b>Peso del agua (g)</b>	10,10	13,80	16,80	30,10
<b>Peso material seco (g)</b>	115,90	117,00	118,50	106,90
<b>Contenido de agua (%)</b>	8,71	11,79	14,18	28,16
<b>Densidad suelo húmedo (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,70	2,01	1,89	1,84
<b>Densidad seca material</b>	1,56	1,80	1,65	1,43
<b>Peso unitario seco kN/m<sup>3</sup></b>	15,29	17,65	16,22	14,06
<b>Peso unitario seco lbf/ft<sup>3</sup></b>	97,34	112,35	103,27	89,50

Fuente. El autor

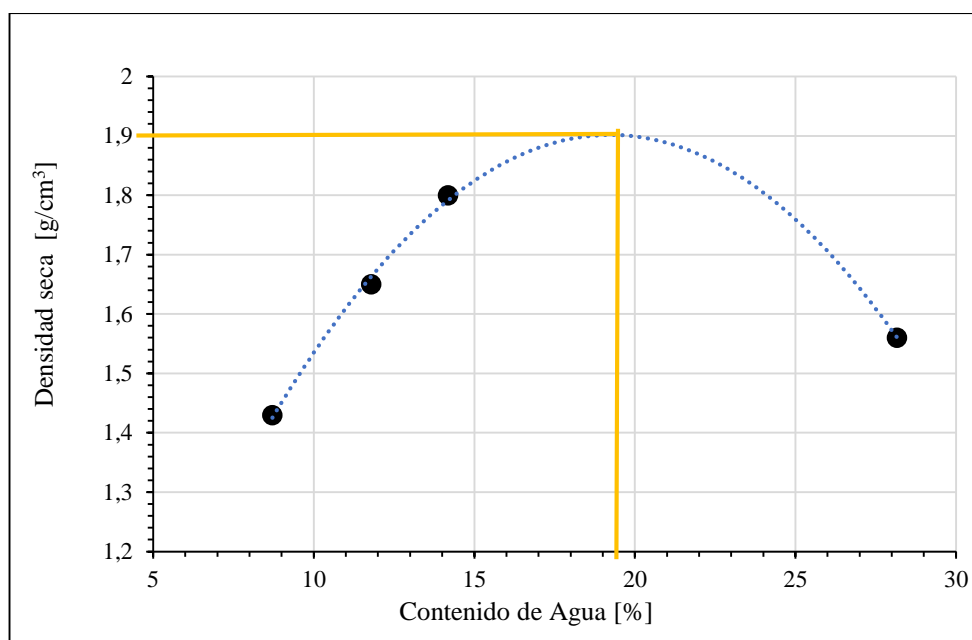


El ensayo de proctor estándar se aplicó al suelo en estudio (caolín), obteniéndose así:

- Densidad seca máxima ( $\text{g/cm}^3$ ) = 1,90
- Humedad optima = 19,5%

En este caso, se calcularon tres puntos en la rama seca y un punto en la rama húmeda, como se observa en la Grafica 1, y a partir del parámetro de Densidad máxima se calcularon todas las mezclas. Cabe resaltar que los resultados obtenidos son coherentes de acuerdo con investigaciones realizadas.<sup>52</sup>

Figura 11. Resultados, ensayo de proctor estándar



Fuente. El autor.

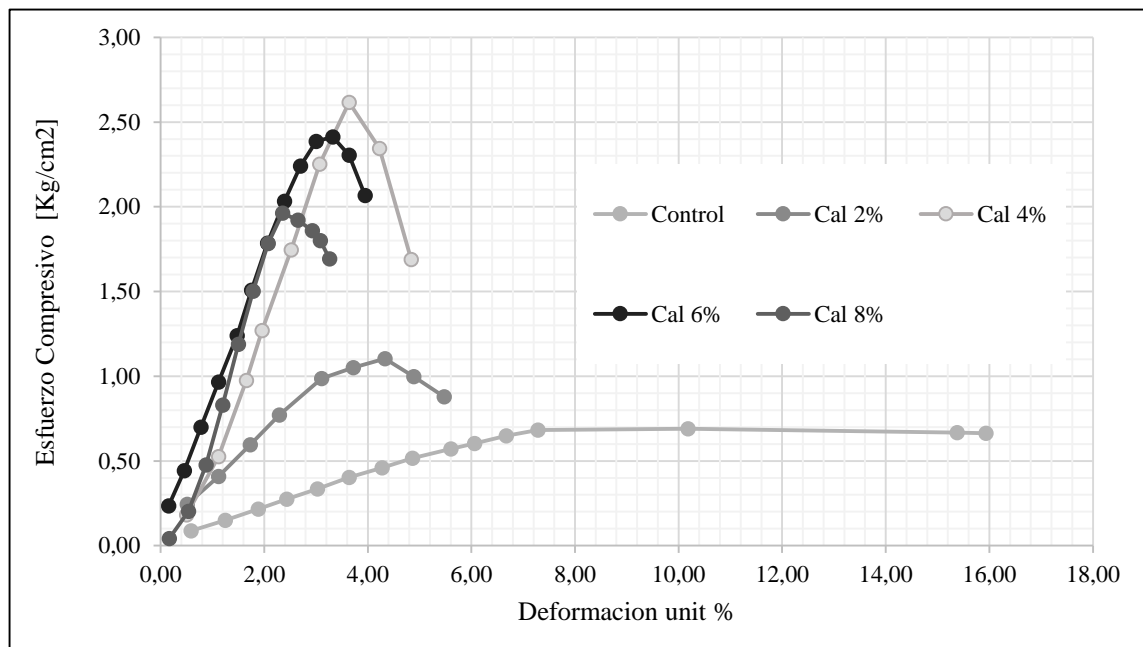
<sup>52</sup> Coordinación general de minería. *Perfil de mercado del caolín* [en línea]. México [octubre, 2014]. [Fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5565/pm\\_caolin\\_2014.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5565/pm_caolin_2014.pdf)

## 6.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

### 6.3.1 Estabilización de suelo con cal viva

Se presentan los resultados de resistencia a la compresión obtenidos del suelo estabilizado con cal (Ver Grafica 2), con diferentes dosificaciones del material que corresponden al 2%, 4%, 6% y 8%.

Figura 12. Comparación (muestra control vs dosificaciones de cal)



Fuente. El autor

-Como bien se ha mencionado a lo largo de la investigación, el principal efecto de la cal en la estabilización de suelos, es su capacidad para absorber la humedad disuelta, para este caso en los cuerpos de ensayo fallados a compresión.

De acuerdo a esto, en la Grafica 2, (Muestra control vs dosificaciones cal), se observa que inmediatamente la cal cuando tiene contacto con la humedad aplicada experimenta un aumento en su resistencia. Es importante aclarar que, la adición de cal en cualquier dosificación comparativamente con la muestra de control del 100% de caolín, experimenta una mejoría, pues prácticamente se obtiene un comportamiento lineal creciente.

- Teniendo como base de comparación los resultados de la muestra de control, se puede observar que la falla se presentó al 7.2% de la deformación unitaria, mientras que en presencia de material estabilizante la falla se presentó en promedio (teniendo en cuenta cada dosificación de cal) al 3.4% de la deformación unitaria, indicativo clave del mejoramiento del comportamiento mecánico del suelo.

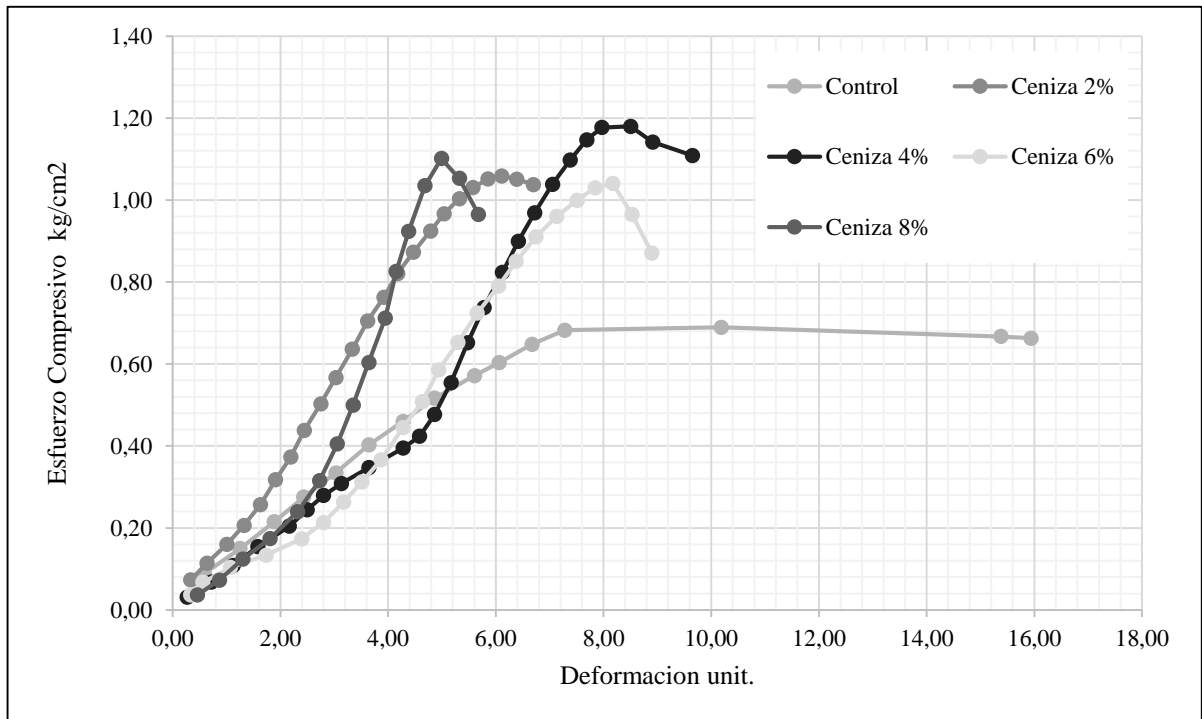
En términos de ductilidad y fragilidad, la muestra con mayor comportamiento dúctil es la de control debido a la deformación casi constante, es decir, luego de la ruptura la deformación se extendió del 7% hasta el 16%, mientras que los diferentes porcentajes de cal mostraron un comportamiento más frágil debido a la caída brusca del esfuerzo luego de la ruptura.

- Se podría decir entonces que la muestra con mejor resistencia, es respectivamente la del 4% de adición de cal, le sigue la del 6%, 8% y 2%.

### 6.3.2 Estabilización de suelo con ceniza volante

Realizado el análisis de la estabilización con cal, se comparó también la resistencia a la compresión en los cuerpos de prueba con la adición de ceniza volante al 2%, 4%, 6% y 8% respectivamente, con la muestra control (100% caolín), como se muestra en la Grafica 3.

Figura 13. Comparación (muestra control vs dosificaciones de ceniza volante)



Fuente. El autor

La ceniza volante, a diferencia de la cal viva no posee el efecto de absorber la humedad a través de una reacción química (exotérmica); su característica principal, es la capacidad de aglomerar partículas, aumentando su capacidad de cohesión.

De acuerdo a esto, respecto a la muestra de control, cuya deformación al momento de la falla fue al 7% de la deformación unitaria, se puede observar que la deformación en las muestras mejoradas con ceniza al momento de la falla es en promedio del 6,8%, lo que indica que en términos de deformación la estabilización con ceniza no es tan efectiva para reducir deformaciones unitarias.

Por otro lado, se puede evidenciar que la adición de ceniza aumenta la resistencia del suelo, dándole un comportamiento dúctil, pero a comparación de la muestra de control, es menor, ya que respectivamente en los porcentajes de 2% y 4% se observa, cómo luego de la ruptura, se mantiene la resistencia y luego decrece.

Teniendo en cuenta esto, es posible observar que, en términos de fragilidad, las que presentan este comportamiento, son las muestras mejoradas con el 6% y 8%, puesto que llegan a la ruptura y luego su resistencia decrece abruptamente.

Por último, se evidencia que, la muestra con estabilizante de ceniza que arrojó mejor resistencia a la compresión fue al 4%.

### **6.3.3 Comparación de las propiedades del suelo estabilizado con cal y ceniza volante**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el suelo mejorado con cal y ceniza en términos de esfuerzo máximo, deformación máxima y rigidez

(calculada a partir de la relación entre el esfuerzo compresivo y la deformación unitaria). (Ver Tabla 7 y 8).

Tabla 7. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con cal

<b>Cal</b>			
<b>Porcentajes</b>	<b>Esfuerzo Max (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rigidez</b>	<b>Deformación Max</b>
0	0,689	0,094	1,590
2	1,104	0,29	5,473
4	2,616	0,886	4,837
6	2,413	0,808	3,946
8	1,963	1,104	3,258

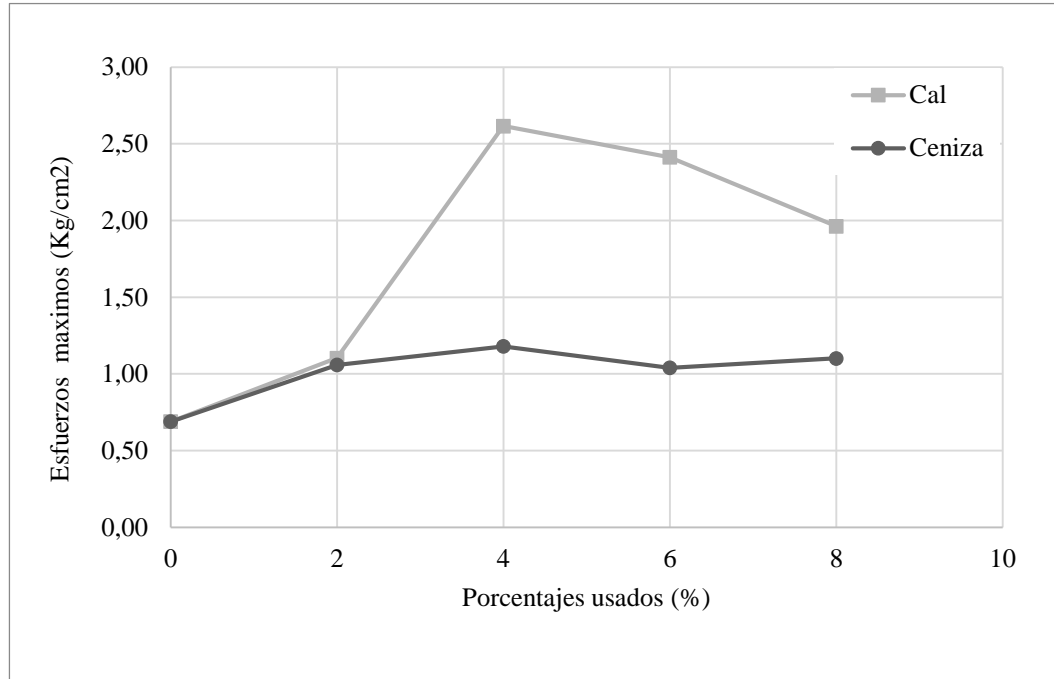
Fuente. El autor.

Tabla 8. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con ceniza

<b>Ceniza</b>			
<b>Porcentajes</b>	<b>Esfuerzo Max (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rigidez</b>	<b>Deformación Max</b>
0	0,689	0,094	1,590
2	1,059	0,224	6,695
4	1,180	0,251	9,648
6	1,040	0,184	8,897
8	1,101	0,186	5,677

Fuente. El autor.

Figura 14. Esfuerzos máximos vs Porcentajes de cal y ceniza



Fuente. El autor

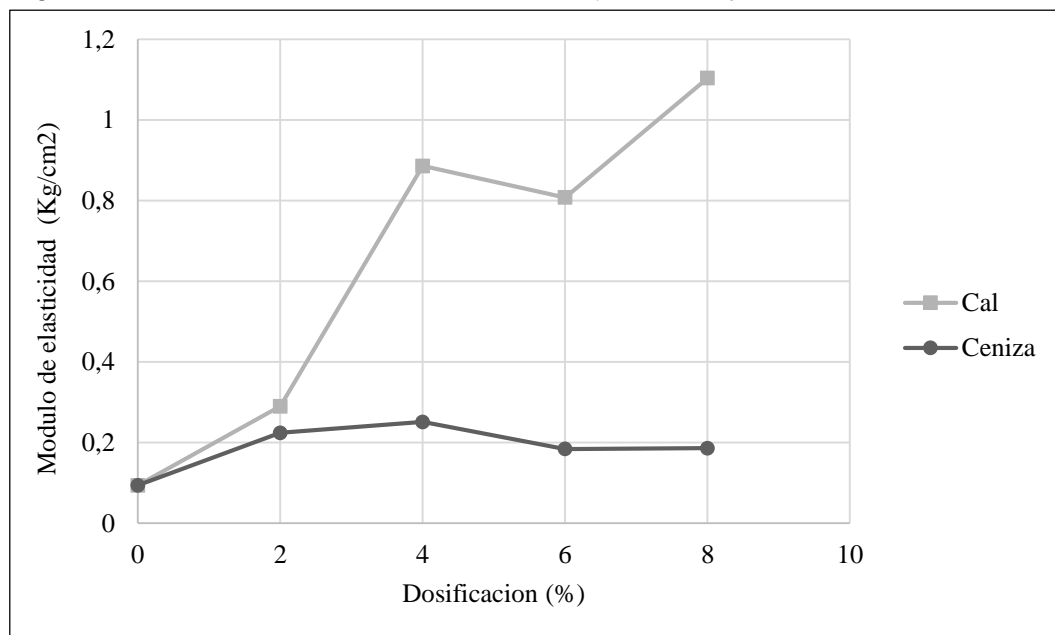
En cuanto a esfuerzos máximos, como se indica en la Grafica 4, se observa que la cal en comparación con la ceniza, al aumentar el porcentaje de estabilizante, aumenta su resistencia debido a la reacción exotérmica que se produce en la cal al contacto con la humedad disuelta en el suelo; mientras que en la ceniza volante ocurre un acomodamiento de partículas lo que aumenta la resistencia, pero no es tan significativamente como la cal viva.

Se comparó además la rigidez o módulo de elasticidad para cada porcentaje de material como se muestra en la Grafica 5, en donde se observa claramente que el aumento de la rigidez en la cal es proporcional a la dosificación usada en el

suelo mejorado, esto debido a que la reacción de la cal y el agua es inmediata generando un aumento muy rápido en la resistencia. Caso contrario, se observa que la ceniza volante hasta el porcentaje del 4%, tiene un comportamiento con tendencia a aumentar, pero luego decrece, esto debido a que como se mencionaba anteriormente, la ceniza brinda ductilidad al suelo en vez de rigidez.

Finalmente se observa, que en ambos materiales el porcentaje con mayor aumento de la rigidez es en el 4% pero luego decrece en el 6% y vuelve a aumentar en el 8%, esto debido a la progresiva acomodación de partículas.

Figura 15. Módulo de elasticidad vs Porcentajes de cal y ceniza



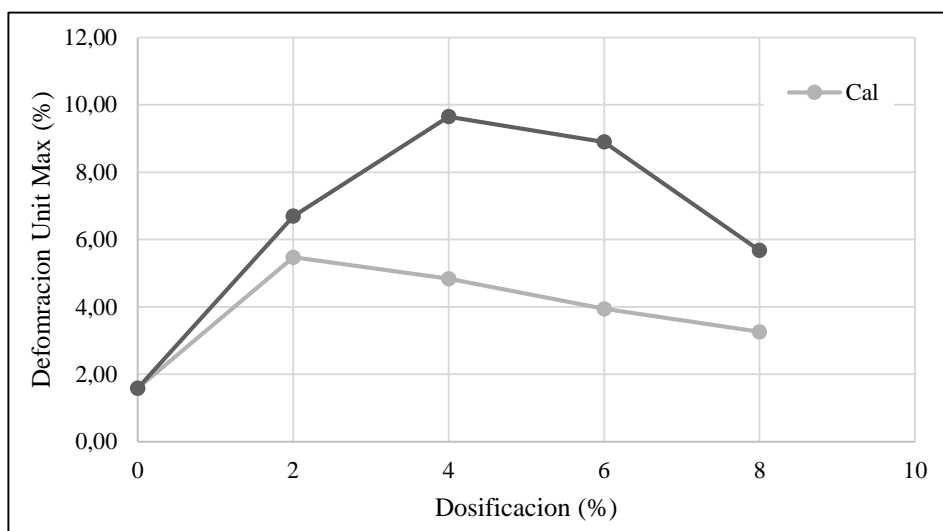
Fuente. El autor.



En términos de la deformación máxima (Ver Grafica 6), es evidente que las muestras con ceniza presentaron la mayor deformación en comparación con las de cal viva, debido a que su comportamiento es más dúctil.

Se evidencia también, que posiblemente para el caso de la ceniza si se agregara más porcentaje de esta al suelo, la tendencia de la deformación seria de disminuir, igualmente para la cal, pero no sería tan significativo

Figura 16. Deformación máxima vs Porcentajes de cal y ceniza



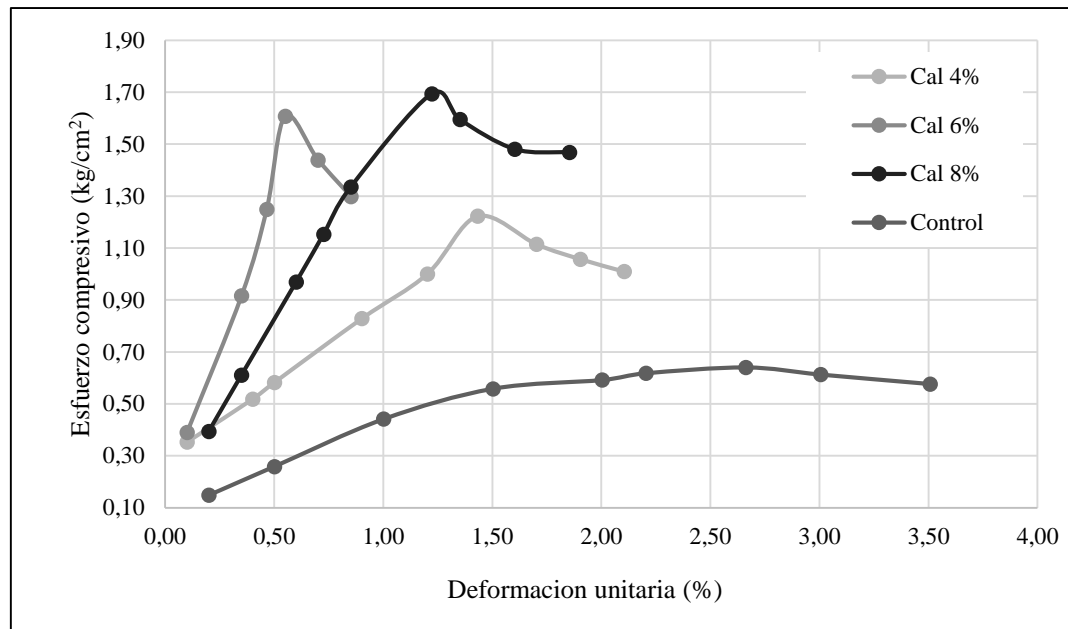
Fuente. El autor

## 6.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

### 6.4.1 Estabilización de suelo con cal viva

Se presentan los resultados comparativos para cada porcentaje de cal viva tomando como referencia la muestra de control, como se muestra en la Grafica 7.

Figura 17. Comparación (muestra control vs dosificaciones de cal viva)



Fuente. El autor.

De acuerdo al comportamiento que se le ilustra en la Grafica 7, se observa que la ruptura se da al 2,6% de la deformación unitaria, mientras que, para los demás porcentajes de cal, en promedio la deformación unitaria en la ruptura es del 1,1%

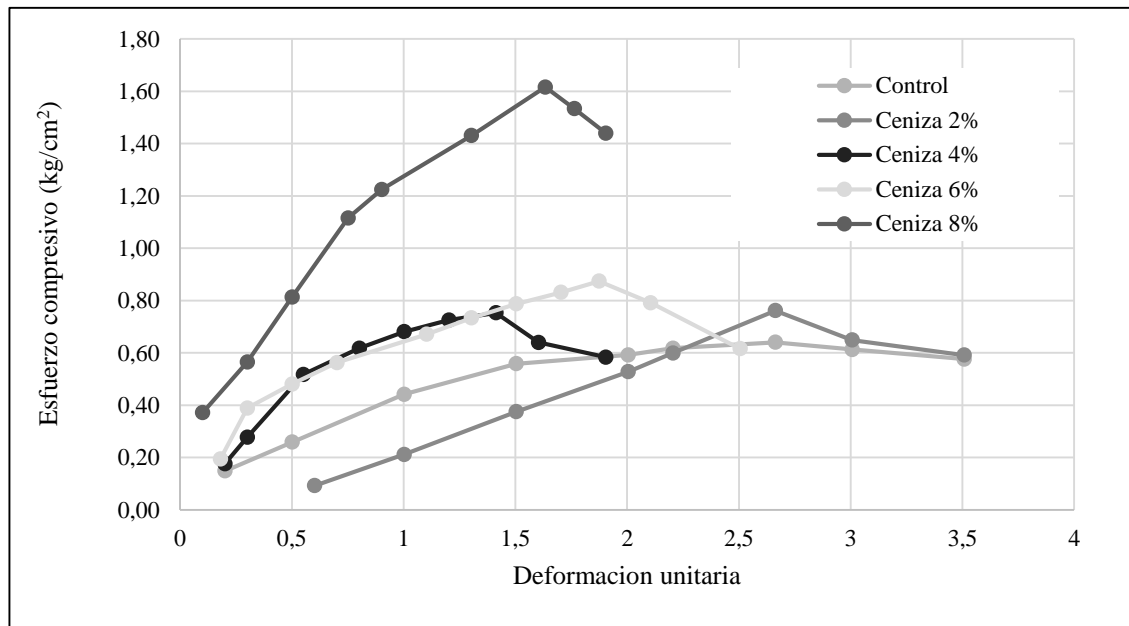
En términos de la ductilidad y fragilidad, los porcentajes de cal del 8% y 4%, incluida la muestra control, corresponden a un comportamiento más dúctil, debido a su comportamiento casi constante, mientras que para el 6% evidentemente se observa un comportamiento frágil por la caída de su resistencia, luego de la ruptura.

Por otro lado, la cal aumenta la resistencia del suelo y esto se puede deducir gráficamente, determinándose así que el porcentaje de adición al suelo con mejor comportamiento mecánico es el de 8%, seguido el de 6%, 4%.

#### 6.4.2 Estabilización de suelo con ceniza volante

Se presentan los resultados para cada porcentaje de ceniza volante, comparados con la muestra de control equivalente al 100% de caolín, (Ver Figura 8).

Figura 18. Comparación (muestra control vs dosificaciones de ceniza volante)



Fuente. El autor.

Para este caso, se observa que los porcentajes menores al 8% de ceniza tienen un comportamiento similar a la muestra de control, lo que permite deducir que el material a tracción es totalmente dúctil especialmente en las muestras con el 2%, 4% y 6% de ceniza volante.

Por otro lado, se podría decir que los porcentajes del 6% y 8 % presentan un comportamiento más frágil debido a la caída de su resistencia luego de la ruptura.

En cuanto a la deformación, se observa que los diferentes porcentajes de ceniza volante, presentan grandes variaciones luego de su ruptura comparativamente con la muestra de control, lo que permite analizar que, la ceniza volante a pesar de aportar resistencia a la tracción, se comporta de manera inestable.

Finalmente, el porcentaje con mejor resistencia a la tracción es del 8%, luego, el 6%, 4% y 2%.

#### **6.4.3 Comparación de las propiedades del suelo estabilizado con cal y ceniza volante**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el suelo mejorado con cal y ceniza en términos de esfuerzo máximo, deformación máxima y rigidez (calculada a partir de la relación entre el esfuerzo compresivo y la deformación unitaria). (Ver Tabla 9 y 10).

Tabla 9. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con cal

<b>Cal</b>			
<b>Porcentajes</b>	<b>Esfuerzo Max (kg/cm2)</b>	<b>Deformación Max</b>	<b>Rigidez</b>
0	0,640	2,663	0,299
2	1,440	2,546	0,364
4	1,222	1,436	0,594
6	1,609	0,546	2,308
8	1,694	1,225	1,473

Fuente. El autor.

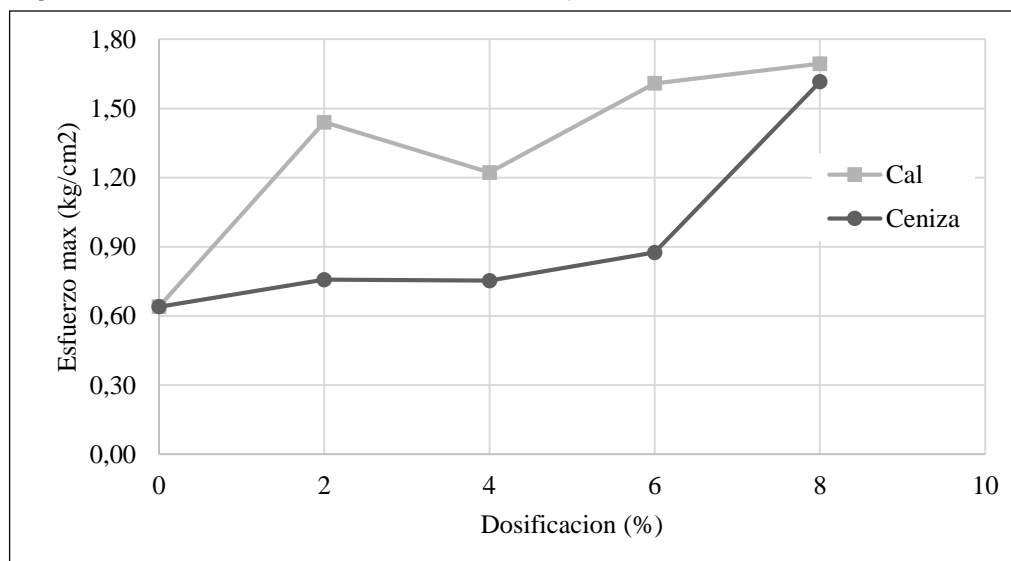
Tabla 10. Esfuerzos máximos, rigidez y deformación máxima del suelo con ceniza volante

Ceniza volante			
Porcentajes	Esfuerzo Max (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación Max	Rigidez
0	0,640	2,663	0,299
2	0,757	3,238	0,314
4	0,753	1,410	0,780
6	0,875	1,876	0,433
8	1,616	1,633	1,263

Fuente. El autor.

Teniendo en cuenta los esfuerzos máximos vs los porcentajes adicionados (Ver Grafica 9), se evidencia que la cal tiene mayor resistencia a la tracción que la ceniza volante, pero se observa además que, la resistencia que adquiere la cal disminuye en el 4% y vuelve a experimentar un aumento hasta el 8% igual que la ceniza, aunque en menor magnitud que la cal; esto obedece a una reacomodación de partículas y la hidratación de estas.

Figura 19. Esfuerzos máximos vs Porcentajes usados



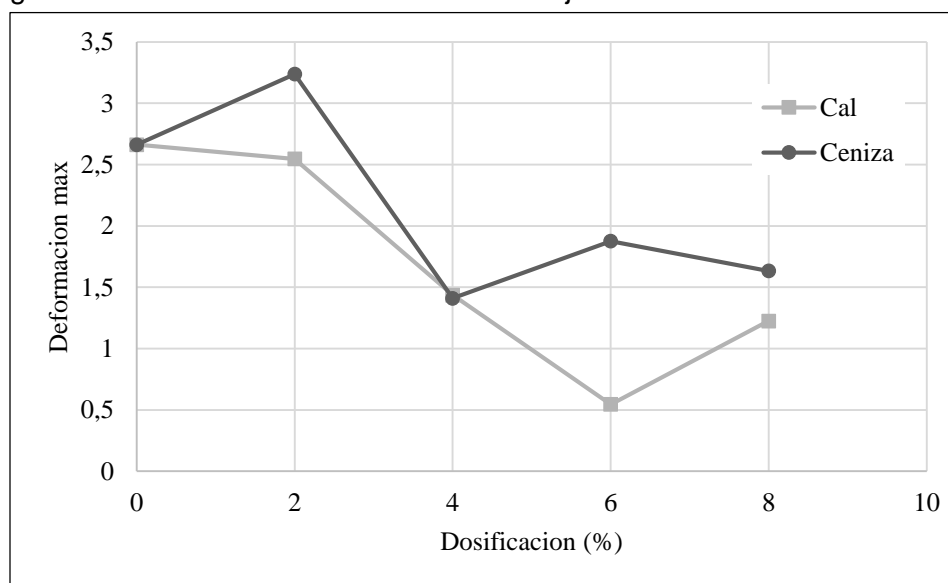
Fuente. El autor

En términos de la deformación máxima (Ver Grafica 20), se observa que tanto la cal como la ceniza del 0% al 2% presentan un comportamiento similar, excepto por que la segunda experimenta una mayor deformación.

A partir del 2% y hasta el 4% de adición, los dos materiales estabilizantes muestran una disminución en su deformación significativamente alta, pero vale la pena resaltar que la cal viva es el material que menos se deforma hasta el 6% de adición; por el contrario, la ceniza en este mismo punto sufre de nuevo un aumento en su deformación.

Finalmente, para el porcentaje de 8%, la deformación es totalmente contraria, es decir, mientras la ceniza disminuye su deformación, la cal aumenta de nuevo, lo que permite establecer que la ceniza sufre menor deformación al 4% de adición y la cal sufre menor deformación al 6% de adición.

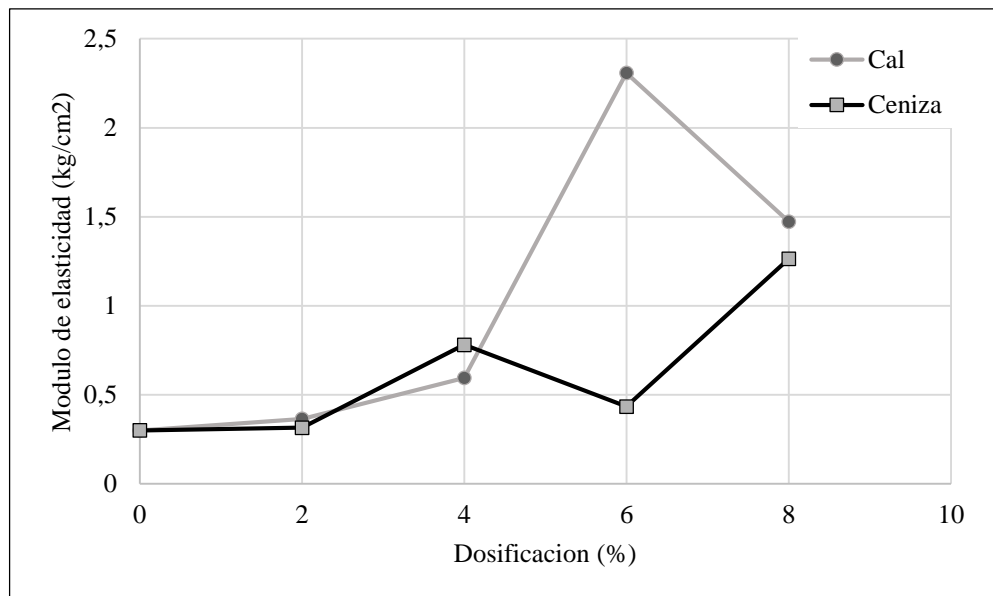
Figura 20. Deformación máxima vs Porcentajes usados



Fuente. El autor.

En cuanto a la rigidez se refiere (Ver Grafica 11), la cal viva evidentemente alcanza un máximo en el 6% de adición, por lo que se podría decir que es el porcentaje óptimo. Por el contrario, la ceniza alcanza su máxima rigidez en el 8% mientras que en la cal disminuye de manera considerable debido a la reacción de hidratación que se genera en el interior del suelo.

Figura 21. Módulo de elasticidad vs Porcentajes usados



Fuente. El autor

Por último, es importante resaltar que el comportamiento en cada una de las dosificaciones de material tanto para cal como para ceniza, se observa un comportamiento inverso, es decir, si bien desde el 0% hasta el 4% los materiales tienden a tener un comportamiento similar, en el 2%, la cal se encuentra ligeramente

por encima de la ceniza, pero a medida que se avanza hacia la derecha (en sentido de mayor porcentaje), se observa que en el 4%, la ceniza se encuentra por encima de la línea de la cal, y de nuevo en el 6%, la rigidez de la cal aumenta abruptamente mientras que la de la ceniza decrece abruptamente. Por lo tanto, se podría decir que estos dos materiales tienen un comportamiento variable a tracción, lo que, a nivel real, indica que los materiales buscan cierta tendencia al equilibrio (como se observa en el 8%) al aplicarse distintas cargas.



## **7. CONCLUSIONES**

Como bien se planteó en los objetivos, mediante el análisis de los ensayos de compresión y tracción fue posible plantear comparaciones con los dos materiales estabilizantes, en donde, se pudo observar que independientemente del porcentaje de adición de cal viva, fue notorio el aumento de la resistencia en dichos cuerpos de prueba, lo que permite ratificar la versatilidad de este material en la estabilización de tipo química en los suelos con altos contenidos de arcilla. No obstante, los parámetros de esfuerzo máximo y rigidez tienen una tendencia creciente para la cal viva, debido a la reacción que se genera con el agua disuelta (secado), lo que apoya la idea de que este material indiscutiblemente es una buena opción para el tratamiento de suelos, especialmente por su economía y facilidad en cuanto a su uso.

De igual forma, a tracción, la cal demostró un buen comportamiento mecánico especialmente para la adición del 8%, de acuerdo a esto, se puede concluir que, respecto a la muestra de control, la resistencia a la tracción aumento, mejorando el comportamiento de la muestra.

En cuanto al uso de la ceniza volante, escogido como material alternativo, se puede concluir que no mostro a compresión un comportamiento tan satisfactorio como la cal viva y como efecto negativo se observó que fue el material con mayor deformación unitaria (9,8% aproximadamente, comparativamente con la cal,

cuya deformación máxima fue de 5.7% y la muestra de control, que fue del 1,8%). Esta deformación del 9,8%, es un indicativo de que, al adicionar ceniza, el cuerpo de prueba se vuelve más dúctil lo que limita el aumento de la resistencia a la compresión.

Se concluye además que, en la aplicación del ensayo de compresión, el porcentaje óptimo de cal viva es del 4% en lo que refiere a esfuerzo máximo, del 8% en lo que refiere a rigidez y del 8% en lo que refiere a deformación (menor deformación). Para la ceniza, el porcentaje óptimo en lo que refiere a esfuerzo máximo fue del 4%, del 4% en lo que refiere a rigidez, y del 8% en lo que refiere a deformación.

A tracción, las muestras con ceniza volante, mostraron un esfuerzo máximo similar al obtenido con cal, lo que permite concluir que cualquiera de los dos materiales puede ser usado satisfactoriamente para la estabilización de suelos ya que aumentan la resistencia del suelo.

Adicionalmente, en el ensayo a tracción, el porcentaje óptimo de cal es del 8% al igual que la ceniza, en lo referente a esfuerzos máximos, del 6% para cal y del 8% para ceniza en lo referente a rigidez, del 6% para cal y 4% de ceniza, referente a deformación.

Complementario a esto, la técnica usada para el mejoramiento de suelo en la presente investigación es viable desde el punto de vista técnico ya que, a través de los ensayos de compresión y tracción, los criterios de módulo de elasticidad

(rigidez), deformación máxima y esfuerzos máximos demostraron satisfactoriamente que el suelo se puede mejorar in-situ, brindándole buenas condiciones de resistencia pero agregándole un “plus” en el aspecto económico, puesto que se estarían reduciendo costos por concepto de transporte de material con cierta granulometría para mejorar un suelo.

## **8. RECOMENDACIONES**

Finalmente, la presente investigación abarco todo lo referente a la caracterización mecánica, es decir, la acción de cargas monotónicas a compresión y tracción. Sin embargo, para futuras investigaciones se sugiere analizar el módulo resiliente el cual indica un comportamiento más real ya sea de un pavimento o suelo, puesto que está sometido a cargas dinámicas, es decir, se simulan las cargas de tránsito que puede tener una vía de tipo primario o secundario.

Se recomienda, además, para futuras investigaciones, analizar el comportamiento mecánico que podría tener la cal y la ceniza volante en conjunto, y determinar a través de diferentes porcentajes si es posible obtener mejores resultados en cuanto a resistencia a la tracción, compresión y rigidez, teniendo en cuenta otros parámetros como humedad, módulo resiliente, etc.

## BIBLIOGRAFIA

**AGUDELO ANGIE; ESPINOSA BRYAN.** *Análisis de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con adición de ceniza volante de Termo Paipa.* Trabajo de investigación en campo. Universidad Católica de Colombia. 2017.

**ANFACAL.** *Estabilización de suelos con cal.* [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en:

[http://anfocal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Estabilizacion\\_de\\_suelos\\_con\\_cal-REBASA-PresentacionA.pdf](http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estabilizacion_de_suelos_con_cal-REBASA-PresentacionA.pdf)

**ANYAYPOMA JARA, R.** *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso.* Trabajo de investigación en campo. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú. 2014.

**ARANDA, PABLO.** *Efecto de la adición de hidróxido de calcio sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante.* Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. 2014.

**BARTOLOMÉ J. F.** *El caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones.* Instituto de Ciencia de materiales de Madrid. 1997. Recuperado de: <http://boletines.secv.es/upload/111222333.199736007.pdf>

**Calcinor.** [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-de-suelos/>

**CAPITULO 2. Ceniza volante. [Medios audiovisuales].** [en línea] [fecha de consulta 22 de abril de 2018]. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/capitulo2.pdf>

**Crista-mine. Mineral caolinita.** [en línea]. [Fecha de consulta, 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www2.uned.es/cristamine/inicio.html>

**DIAZ HECTOR.** *Definición de suelo.* [en línea] [fecha de consulta 14 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/HECTORVICENTEDIAZOSPINA/4-definicion-de-suelo>

**FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN.** *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base.* Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006.

**FRANCO LOPES, LUIS J.; MORALES, JOHNNY. *Normas para la utilización de cal útil en la estabilización de suelos*.** Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 1982

**FRANKIE. *Permeabilidad de los suelos: concepto y determinación (in situ y en laboratorio)*.** [en línea] [fecha de consulta 18 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>

**INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (INVIAS). *Sección 100. Compresión inconfiada en muestras de suelo*.** INV E-152-13. [en línea] [fecha de consulta 09 de octubre de 2018]. Disponible en:  
file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod\_2013-NOV-15.pdf

**INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (INVIAS). *Sección 100. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua*.** INV E-128-13. [en línea] [fecha de consulta 21 de marzo de 2018]. Disponible en:  
file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod\_2013-NOV-15.pdf

**INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (INVIAS). *Sección 100. Relaciones humedad-Peso unitario seco, en los suelos (Ensayo estándar de compactación)*.** INV E-141-13. [en línea] [fecha de consulta 21 de marzo de 2018]. Disponible en:  
file:///C:/Users/manue/Downloads/SECCIÓN%20100%20Suelos%20mod\_2013-NOV-15.pdf

***Introduction to pavement design*.** [en línea] [fecha de consulta 21 de abril de 2018]. Disponible en:  
[https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100\\_LnTse/401\\_LnTse/plain/plain.html](https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100_LnTse/401_LnTse/plain/plain.html)

**Lhoist. *La cal a lo largo de la historia*.** [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.lhoist.com/es/la-cal-lo-largo-de-la-historia>

**M. BOTERO, WILLIAM; B. CORDOBA, JORGE. *Utilización de mezclas con ceniza y cal en pavimentos flexibles*.** Trabajo de grado. Pontifica Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 1978

**M. R. HALL, K. B. NAJIM, P. KEIKHAEI DEHDEZI. *Soil Stabilization and earth construction: materials, properties and techniques*.** [en línea] [fecha de consulta 18 de marzo de 2018]. University of Nottingham. United Kingdom. 2014

**MINOTTA, GUILLERMO. *Estabilización de suelos con cal y cemento*.** Trabajo de investigación. Pontifica Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 1962

**MURRAY, ANN. *La diferencia entre la cal hidratada y la cal viva*.** [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. Disponible en: [http://www.ehowenespanol.com/diferencia-cal-hidratada-cal-viva-info\\_548324/](http://www.ehowenespanol.com/diferencia-cal-hidratada-cal-viva-info_548324/)

**NACIONAL LIME ASSOCIATION. *Manual de estabilización de suelo tratado con Cal: Estabilización y modificación con cal*.** [en línea] [fecha de consulta 9 de marzo de 2018]. Disponible en: [https://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf](https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf)

**RODRIGUE ALEXANDRE, DUCHESNE JOSEE, FOURNIER BENOIT, BISSONNETTE BENOIT. *Costruction and building materials. "Influence of added water and fly ash content the characteristics, properties and early-age cracking sensitivity of alkali-activated slag/fly ash concrete cured at ambient temperature*.** 2018. Quebec, Canadá. PP. 930-941

**SALAZAR ALEJANDRO. *¿Qué es una puzolana?*** [en línea]. [fecha de consulta: 21 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

***Soil stabilization with lime and fly ash*.** [en línea] [fecha de consulta 21 de abril de 2018]. Disponible en: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-with-lime-flyash/5577/>

**ULLOA FERNANDEZ, LUIS. *Utilización de cenizas volantes en la fabricación de cemento*.** Consejo Superior de Investigaciones Científica. España. Licencia Creative Commons 3.0. Pp. 23.

---

Firma Estudiante  
Nombre Estudiante: Manuel Gerardo Parra Gómez  
Código        505587

---

Firma Asesor del Trabajo de Grado  
Nombre: Juan Gabriel Bastidas Martínez

---

Firma Jurado del Trabajo de Grado



Nombre: Cesar David Quintana Cabeza